



Pro gradu -tutkielma
Hydrosfäärin geofysiikka

Kuutsjärven ja Tippakurulammen lämpötilan muutokset vuosina 2010–2012

Salla Kuittinen

15.3.2021

Ohjaajat: Matti Leppäranta
Jan Weckström

Tarkastaja: Petteri Uotila

HELSINGIN YLIOPISTO
ILMAKEHÄTIETEIDEN MAISTERIOHJELMA

Yliopistonkatu 4, 00100 Helsinki

“ilimoista kiinni ku suitsalaisten naisein lähtö”

—Kesälahtelainen sanonta, Suitsa on saari Karjalan Pyhäjärvessä

Tiedekunta — Fakultet — Faculty		Koulutusohjelma — Utbildningsprogram — Education programme	
Matemaattis-luonnontieteelliseen tiedekunta		Ilmakehätieteiden maisteriohjelma	
Tekijä — Författare — Author Salla Kuittinen			
Työn nimi — Arbetets titel — Title Kuutsjärven ja Tippakurulammen lämpötilan muutokset vuosina 2010–2012			
Opintosuunta — Studieinriktning — Study track Hydrosfäärin geofysiikka			
Työn laji — Arbetets art — Level Pro gradu -tutkielma	Aika — Datum — Month and year 15.3.2021	Sivumäärä — Sidoantal — Number of pages 050 sivua	
Tiivistelmä — Referat — Abstract			
<p>Auringon säteilyn voimakkuus vaihtelee vuodenaikojen mukaan Suomessa. Tämän seurauksena järvien kerrostuneisuudessa tapahtuu muutoksia. Värriön luonnonpuistossa järvien tutkimus on ollut vähäistä, ja lämpötilaseurantaa ei aikaisemmin alueen järvissä ole tehty ympärivuotisesti. Aineiston avulla selvitettiin Kuutsjärven ja Tippakurulammen lämpötilan muutoksia, eroavaisuuksia, päivittäisiä muutoksia sekä lumen vaikutusta kevään lämpenemiseen tarkastelujakson aikana.</p> <p>Tutkimusaineisto on kerätty Värriön luonnonpuiston Kuutsjärvestä (67° 44'N ja 29° 36'E) sekä Tippakurulamasta (67° 46'N ja 29° 37'E) vuosina 2009–2012. Molemmissa järvissä oli yksi termistoriketju järven syvimessä kohdassa. Termistoreita ketjussa oli viisi kappaletta. Tulosten tarkastelussa apuna käytettiin Ilmatieteen laitoksen sää- ja lumihavaintoja.</p> <p>Auringon säteilyn voimakkuus on merkittävin Kuutsjärven ja Tippakurulammen lämpötiloihin vaikuttava tekijä. Päivittäisissä muutoksissa ei ole eroavaisuuksia järvien välillä. Tippakurulampi lämpenee tummempana ja matalampana järvenä pohjaa myöten kesän aikana. Kesän aikana sedimenttiin varastoitunut lämpö purkautuu talvella veteen. Kevään täyskierto on molemmissa järvissä lyhyt ja tapahtuu toukokuun loppupuolella. Syksyn täyskierto on Tippakurulamassa Kuutsjärveä pidempi, ja Tippakurulampi jäähtyy sekoittuneessa tilassa. Eroavaisuudet järvien välillä johtuvat koko- ja värierioista.</p>			
Avainsanat — Nyckelord — Keywords hydrosfääri, järvi, limnologia, täyskierto, Kuutsjärvi, Tippakuru, Värriö, termistoriketju			
Säilytyspaikka — Förvaringsställe — Where deposited HELDA			
Muita tietoja — övriga uppgifter — Additional information			

Sisällysluettelo

1	Johdanto	1
2	Teoria	4
2.1	Pinnan energiatase	5
2.1.1	Turbulenttinen lämmönvaihto	7
2.1.2	Pinnan energiataseen yhtälö	7
2.2	Vesitase	9
2.3	Vuodenaikojen vaikutus	10
2.3.1	Talvi	10
2.3.2	Kesä	12
2.3.3	Kevät ja syksy ovat täyskierron aikaa	14
3	Aineisto ja menetelmät	16
3.1	Värriön erämaa-alue	16
3.2	Mittaukset	20
3.2.1	Termistoriketjut	20
3.2.2	Sää- ja lumihavainnot	20
3.3	Värriön ilmasto	21
4	Tulokset	23
4.1	Päivittäisten vaihteluiden eroavaisuudet	23

4.2	Tippakurulammen ja Kuutsjärven kuukausittaiset lämpötilaerot . . .	26
4.3	Pystysuoran keskilämpötilan eroavaisuudet	28
4.4	Täyskierto	30
4.4.1	Täyskierron ajankohta	30
4.4.2	Veden tiheys täyskierron aikana	30
4.5	Vuosittaiset lämpötilavaihtelut	32
4.6	Pohjan vaikutus	34
4.7	Lumen syvyyden vaikutus Kuutsjärven lämpenemiseen keväällä . . .	37
4.7.1	Ilman lämpötila vuosina 2009–2012	40
4.7.2	Lumiolosuhteet 2009–2012	41
5	Keskustelu	43
5.1	Talvi	43
5.2	Kevään täyskierto	44
5.3	Kesä	45
5.4	Syksyn täyskierto ja Kuutsjärven jäätyminen	46
5.5	Mahdolliset rajoitteet mittauksissa	47
6	Johtopäätökset	49
	Kirjallisuus	52
	Lähteet	52

1. Johdanto

Auringon säteilyn voimakkuus on yksi merkittävimmistä järven lämpötilaan vaikuttavista tekijöistä [Strangeways, 2007, s. 57–130]. Vuodenaikojen vaihtuminen tuo muutoksen järven lämpötilaan ja kerrostumiseen. Kesän aikana järvi kerrostuu. Päällysveden lämpötila on korkein. Päällysveden jälkeen tulee harppauskerros, ja lähellä pohjaa on viileä alusvesi. Päällysveden lämpötila kasvaa keskimäärin heinäkuulle saakka. [Leppäranta, 2017, s. 103]

Jäähtyminen saa aikaan konvektiosekoittumisen, joka laajenee järven täyskierroksi. Syksyllä järvi voi pysyä sekoittuneessa tilassa useita viikkoja, jopa kuukausia riippuen ilman lämpötilasta ja tuulisuudesta. Sekoittuminen päättyy, kun pinnan lämpötila laskee ja jääkansi alkaa muodostua [Eloranta, 1997]. Talvella jääkannen alla on lähes jäätymisspisteessä oleva päällysvesi. Lämpimin vesi sijaitsee alusvedessä lähellä pohjaa [Leppäranta, 2015]. Talven aikana tuuli ei sekoita järven pintaa, ja jää ja lumi eristävät järven ilmasta [Leppäranta et al., 2009]. Kesän aikana sedimenttiin varastoitunut lämpö vapautuu lämpövuona järveen. Lämpövuoto sedimentistä ehtyy talven kuluessa. [Kirillin et al., 2012]

Keväällä käynnistyy toinen täyskierto, joka saa alkunsa jo jääkannen alla. Kevättalven aikana lumi sulaa jään päältä, jolloin auringon säteily pääsee tunkeutumaan jääkannen alle lämmittäen päällysvettä. Lämpeneminen käynnistää konvektiosekoittumisen, joka johtaa lopulta täyskiertoon. [Kirillin et al., 2012]

Pääsääntöisesti järvet ovat Suomessa hiilidioksidin lähde, eli ne vapauttavat il-

maan hiilidioksidia. Vähäravinteisista järvistä hiiltä vapautuu ravinteikkaita järviä vähemmän. [Huttunen et al., 2003] Ilmaston lämmetessä on mahdollista, että hiilivuo järvestä ilmakehään kasvaa. Lämpimämmässä vedessä orgaaninen aines hajoaa nopeammin, jolloin hiiltä vapautuu enemmän veteen. Lisäksi erityisesti matalissa järvissä kerrostuneisuus kesäisin saattaa olla heikkoa, jolloin alusveteen sedimentistä liuenneet aineet kulkeutuvat herkemmin pinnalle. [Kiuru et al., 2018]

Pienissä järvissä hiilen hautautuminen on nopeampaa kuin suurissa järvissä. Suomessa pienet järvet sijoittuvat erityisesti Pohjois-Suomeen. [Milardi, 2015] Arktisella alueella, joka kattaa myös Pohjois-Suomen, on ilmaston lämpenemisen enustettu olevan nopeaa [Franke et al., 2019]. Ymmärtämällä järvissä tapahtuvia vuosittaisia muutoksia sekä eri tekijöiden vaikutusta pienten järvien lämpötiloihin voidaan parantaa esimerkiksi käsitystä ilmastonmuutoksen vaikutuksesta näihin järviin ja ympäröivään ilmastoon.

Kuutsjärvestä ja Tippakurulamasta julkaistu tieto keskittyy sedimenttiai-
neistoon ja kalatutkimukseen. Marco Milardin väitöskirja "Fish out of place - Evaluating the impact of fish introductions on freshwater ecosystems" vuodelta 2015 käsittelee kalakantojen vaikutusta pienten pohjoisten järvien ekosysteemiin ja ravintoverkkoon. Väitöskirjassa tutkitaan Kuutsjärven ja Tippakurulammen lisäksi Pirunkurulampea Värriön tutkimusaseman lähellä. [Milardi, 2015] Kuutsjärven sedimentistä on kartoitettu fissioreaktion isotooppia ^{137}Cs [Jousi, 2017] sekä biogeenisen piidioksidin pitoisuutta [Tallberg et al., 2015]. Termistoriketjumittaukset tehtiin tukemaan Kuutsjärven kalanäytteistä ja sedimenttikairauksista saatavaa aineistoa. Mittaukset suoritettiin Kuutsjärven ja Tippakurulammen syvimmästä kohdasta termistoriketjun avulla toukokuusta 2009 elokuuhun 2012 asti.

Tippakurulammen ja Kuutsjärven lämpötilakehitystä ei aikaisemmin ole seurattu. Keskeisenä asiana tarkastelussa on havainnoida Kuutsjärven ja Tippakurulammen lämpötilakehitystä vuosina 2010–2012. Tarkoituksena on selvittää, mitkä

tekijät vaikuttavat järvien lämpötilan muutoksiin, ja onko järvien lämpötilakehityksessä eroavaisuuksia. Lisäksi tarkastellaan järvien kerrostuneisuutta kesällä ja talvella, täyskiertoa sekä vuorokausittaisten lämpötilamuutosten eroavaisuuksia. Tutkielmassa havainnoidaan myös lumen syvyyden vaikutusta järven keväiseen heräämiseen. Tutkielman tarkoituksena on luoda kokonaiskuva Kuutsjärven ja Tippakurulan lämpötilamuutoksista eri vuodenaikoina sekä vertailla järviä keskenään. Saatuja tuloksia voidaan hyödyntää vertailukohteena muille arktisten alueiden pienille järville sekä mahdolliseen pidempiaikaiseen lämpötilanseurantaan Värriön alueen järvissä.

2. Teoria

Vesimolekyyli muodostuu happi- ja vetyatomeista, jotka ovat liittyneenä kovalenttisilla sidoksilla toisiinsa. Vesimolekyylit yhdistyvät vetysidoksilla. Tämän ansiosta vedellä on suhteellisen korkea kiehumis- ja sulamispiste. Vetysidoksien ansiosta molekyylit pystyvät kiertymään ja järjestymään. Jäässä vetysidokset ovat tiukasti järjestäytyneitä, mutta nesteessä ollessaan sidoksia muodostuu ja purkautuu jatkuvasti. Jäätyessään molekyylien välisten sidosten välinen etäisyys kasvaa, minkä ansiosta jää pystyy kellumaan veden pinnalla. [Dodds, 2010, s. 13-28]

Veden tiheys määrittää vesimolekyylien paikan järvestä, ja luonnonvesissä veden tiheys vaihtelee veden lämpötilan, liuenneiden aineiden määrän sekä paineen mukaan. Vedellä on tapana siirtyä aina omalle tiheystasolleen. Esimerkiksi syksyllä pinnan jäähtyminen käynnistää konvektiosekoittumisen, joka lopulta johtaa järven täyskiertoon eli pohja- ja pintakerroksen väliseen sekoittumiseen. Täyskierrolla on tärkeä merkitys ravinteiden kierron sekä happipitoisuuden kannalta. [Leppäranta, 2015] Tiheyden muutokset ovat siis oleellinen osa järven elämää. Veden tiheyttä voidaan kuvata lämpötilan yhtälöllä:

$$\rho(T) = 999,8395 + 6,7914 \cdot T \cdot 10^{-2} - 9,8094 \cdot T^2 \cdot 10^{-3} + 1,0171^3 \cdot 10^{-4}$$

$$-1,2846 \cdot T^4 \cdot 10^{-6} + 1,1592 \cdot T^5 \cdot 10^{-8} - 5,0125 \cdot T^6 \cdot 10^{-11} \quad (2.1),$$

jossa T kuvastaa vallitseva lämpötilaa [Jones and Harris, 1992]. Suolapitoisuus kasvattaa veden tiheyttä. [Leppäranta, 2017, s. 49]

Vesi on tiheimmillään 3,98 °C:n lämpötilassa. Järvissä tiheysmaksimin saa-

vuttaminen vaikuttaa veden asettumiseen. Esimerkiksi kesällä tihein viileä vesi on pohjan tuntumassa alusvetenä. Täyskierron keväällä aiheuttaa veden lämpeneminen lähelle tiheysmaksimia, jolloin vesi vajoaa aiheuttaen konvektiota, ja syksyllä täyskierron aiheuttaa pinnan jäähtyminen tiheysmaksimiin [Dodds, 2010, s. 13-28].

Vesi toimii hyvänä liuottimena niin kaasuille kuin kiinteillekin aineille. Suomi kuuluu havumetsävyöhykkeeseen, ja täällä järviä ympäröivät metsät sekä maa-aines ovat humuspitoisia. Tämän ansiosta järviin on liuenneena runsaasti erilaisia orgaanisia aineita. Liuenneita ainetta kutsutaan yleisnimityksellä DOM (= dissolved organic matter) ja veden väriin vaikuttavaa orgaanista ainesta nimityksellä CDOM (= colored dissolved organic matter). CDOM absorptoi valoa voimakkaasti lyhyillä aallonpituuksilta ja vaikuttaa näin veden optisiin ominaisuuksiin. Veden värillä on vaikutus valon tunkeutumisvyvyyteen. Liuenneen aineen lisäksi vedessä voi olla kiintoainesta ja klorofylliä. Liennut orgaaninen aines saa usein aikaan veden keltävän tai rusehtavan sävyn ja kiintoainesta harmahtavan vivahteen. [Kirk, 2011, s. 50-95] [Heiskanen et al., 2015]

2.1 Pinnan energiatase

Aurinko on merkittävin energianlähde järvissä. Se lähettää lyhytaaltoista säteilyä, jonka säteilyteho on voimakkainta näkyvän valon aallonpituuksilla [Strangeways, 2007, s. 57-130]. Kuva 2.1 havainnollistaa pinnan energiatasetta, josta huomataan, että vain osa auringon energiasta päättyy järveen [Kirk, 2011, s. 50-95].

Ilmakehässä osa säteilystä imeytyy tai siroaa takaisin avaruuteen ilmakehän molekyyleistä ja pienhiukkasista. Esimerkiksi haitallista UV-säteilyä imeytyy otsooniin tai siroutuu. Auringon säteilyn voimakkuus heikkenee ilmakehässä kasvihuonekaasujen vaikutuksesta. Vesihöyry heijastaa ja imee tehokkaasti auringon säteilyä. Tämän vuoksi pilvisyys vaikuttaa voimakkaasti auringon säteilyn tehokkuuteen. Osa säteilystä heijastuu pilvien yläreunasta takaisin ja osa sitoutuu pilviin. Pil-

visyyden vaikutus riippuu pilvien paksuudesta sekä korkeudesta. [Kirk, 2011, s. 28-44]

Kun auringon valo viimein saavuttaa veden pinnan, on sen kokonaisintensiteetti laskenut alle puoleen ilmakehään saapuneesta säteilystä [Elo, 2007]. Saapuvan säteilyn määrään vaikuttaa pilvisyys, ilmanlaatu, kellon aika, leveyspiiri sekä vuodenaika [Strangeways, 2007, s. 57-130].

Veden pinnasta osa säteilystä siroaa ja heijastuu takaisin. Järviin on liuenneena erilaisia orgaanisia aineita, jotka absorptoivat valoa. Kiintoaines ja levät sirottavat valoa, minkä ansiosta luonnon vedet voivat sirottaa puhdasta vettä tehokkaammin valoa. Liuenneiden aineiden lisäksi valon kulkuun vaikuttavat jään ja lumen esiintyminen. Puhtaan lumen albedo on hyvin suuri, mikä tarkoittaa, että lumi heijastaa voimakkaasti auringon valoa pois pinnasta. Myöskin jääkiteet sirottavat valoa. Lisäksi sirontaan vaikuttaa kasvillisuus, kuten leväkukinnot ja esimerkiksi sääilmiöt, kuten sateet ja tuulen nostattamat aallot. Esimerkiksi sateiden aiheuttama eroosio voi kuljettaa lisää maa-ainesta vesistöön ja näin muuttaa sironnan voimakkuutta. [Kirk, 2011, s. 50-95]

Kaikki valo ei suinkaan heijastu takaisin veden pinnasta ilmakehään, vaan osa jatkaa matkaansa pinnan alle sironneena tai suoraan. Suurin osa järveen päätyneestä säteilystä muuttuu lämmöksi, tai se käytetään hyödyksi fotosynteesissä. Veden olomuoto vaikuttaa valon sitoutumisen määrään. Esimerkiksi jää sitoo voimakkaasti punaisen valon aallonpituuksia ja puhdas vesi heikoiten sinisen valon aallonpituuksia. CDOM ja vesikasvillisuuden kuten kasviplanktonin määrä vaikuttaa valon imeytymiseen. [Kirk, 2011, s. 50-95] Tummissa vesistöissä säteily imeytyy pintaan, kun taas kirkkaissa vesistöissä valo jatkaa matkaansa syvälle [Eloranta, 1997, s. 27-33]. Auringon valo vaimenee eksponentiaalisesti vedessä [O'Sullivan and Reynolds, 2003, s. 107-114].

2.1.1 Turbulenttinen lämmönvaihto

Auringon lisäksi järven lämpötaseeseen vaikuttaa tuuli, joka aiheuttaa turbulentista lämmönvaihtoa. Aistittavan lämmön vuo tasaa lämpötilaeroja. Esimerkiksi kesällä auringon laskettua järven pinta voi olla lämpimämpi kuin ilma. Järven pinnasta siirtyy lämpöä ilmaan. [Leppäranta, 2017, s. 65-92] Tätä lämpövuota kutsutaan aistittavan lämmön vuoksi. Aistittavan lämmön vuota kuvataan yhtälöllä [Leppäranta, 2015, s. 91-136]

$$Q_c = \rho_a c_a C_H (T_a - T_0) U_a \quad (2.2)$$

Toinen turbulenttinen lämmön vuo on haihtumislämpöä, joka kuvaa lämmön siirtymistä veden haihtuessa tai tiivistyessä. [Leppäranta, 2015, s. 91-136]

Haihtumislämmön vuota kuvataan yhtälöllä

$$Q_e = \rho_a L_{e*} C_E (q_a - q_0) U_a. \quad (2.3)$$

Yhtälöissä 2.2 ja 2.3 ρ_a on ilman tiheys, c_a ilman ominaislämpökapasiteetti, C_E ja C_H lämmönvaihtokerroin, T_a ilmanlämpötila, U_a tuulen nopeus, L_{e*} haihtumislämpö sekä q_a ominaiskosteus. Turbulenttisen lämmönvaihdon lisäksi sadanta kuljettaa mukanaan lämpöä ja vaikuttaa näin osaltaan järven pinnan lämpötilaan. [Leppäranta, 2015, s. 91-136]

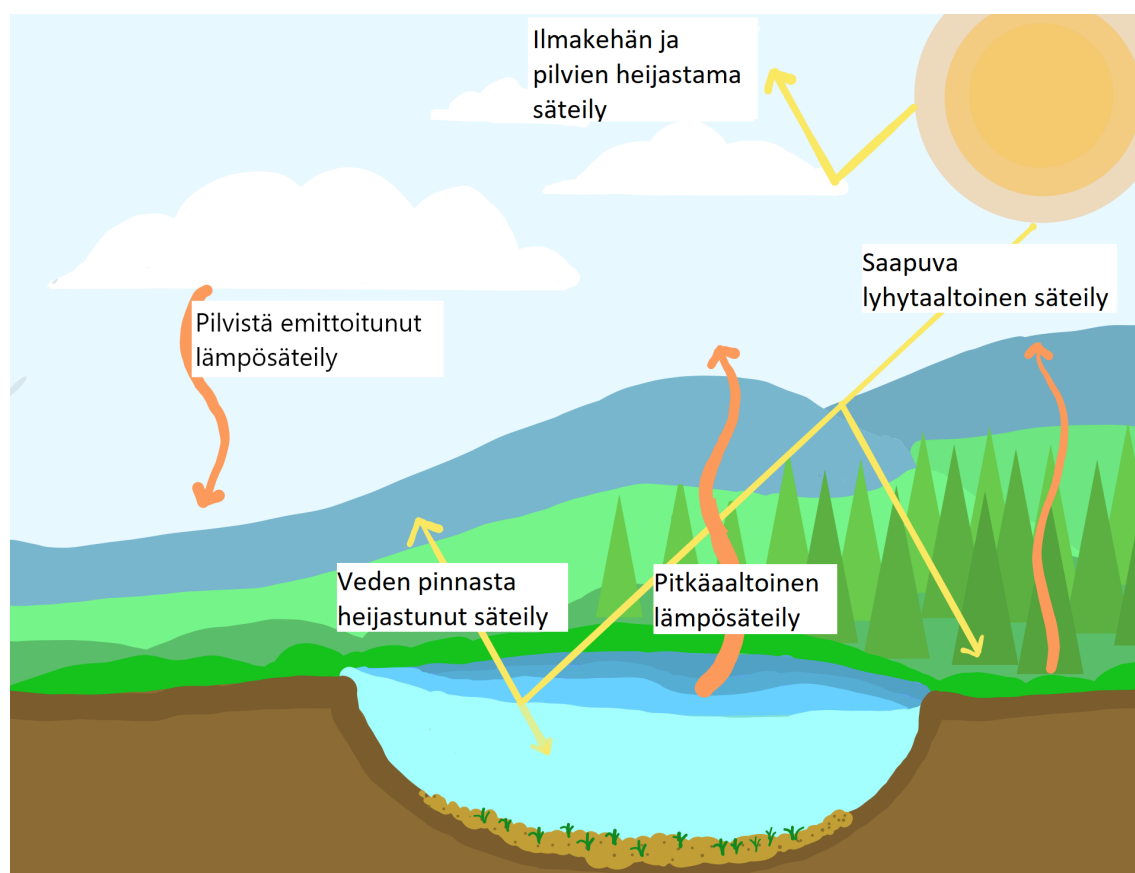
Järvestä siirtyy pitkäaaltoista infrapunälämpösäteilyä ilmakehään. Kaikki pitkäaaltoinen lämpösäteily ei heijastu takaisin avaruuteen, vaan osa siitä sitoutuu esimerkiksi kasvihuonekaasuihin ilmakehään. Pilvet voivat heijastaa pitkäaaltoista säteilyä takaisin maan pintaan, kuten kuvasta 2.1 havaitaan. [Kirk, 2011, s. 50-95]

2.1.2 Pinnan energiataseen yhtälö

Kun yhdistetään yllämainitut tapahtumat, pinnan energiatasetta voidaan kuvata yhtälöllä

$$Q = Q_s - Q_r + Q_{La} - Q_{Lo} + Q_c + Q_e + Q_P, \quad (2.4)$$

missä Q kuvaa veden pinnan kokonaislämpövuota [Leppäranta, 2015, s. 91-136]. Q_s on auringon säteily, Q_r on veden pinnasta heijastunut tai siroannut säteily, Q_{La} ilmakehästä veteen saapuva lämpösäteily, Q_{Lo} vedestä ilmakehään lähtevä lämpösäteily, Q_c aistittavan lämmön vuo, Q_e haihtumisen mukana siirtyvä lämpö sekä Q_P sateen mukana tulevaa lämpöä [Leppäranta, 2015, s. 91-136]. Kun kokonaislämmön vuo Q on positiivinen, vesi lämpenee, ja kun Q on negatiivinen, järven pinta jäähtyy [Leppäranta, 2017, s. 65-92].



Kuva 2.1: Auringosta saapuva säteily heijastuu tai siroaa ilmakehässä. Osa lyhytaaltoisesta säteilystä saavuttaa veden pinnan, josta säteily jatkaa matkaansa pinnan alle tai heijastuu. Maan pinnasta heijastuu pitkäaaltoista lämpösäteilyä.

2.2 Vesitase

Vesitaseella kuvataan, kuinka järven vesimäärä muuttuu ajan suhteen. Vesitaseyhtälö on esitetty Hydrologian perusteet kirjassa muodossa

$$\frac{dV}{dt} = (P - E)A - R, \quad (2.5)$$

missä $\frac{dV}{dt}$ kuvaa tilavuuden muutosta ajan suhteen, P sadantaa, E haihduntaa, A pinta-alaa ja R valuntaa. Sillä voidaan esimerkiksi havainnollistaa, kuinka paljon järven pinta nousee kevät tulvien aikana. [Leppäranta, 2017, s. 171-188]

Sateiden muodostumista voidaan kuvata kolmella eri tyypillä. Orografisessa sateessa maan pinnan muodot aiheuttavat ilman kohoamisen ja jäähtymisen, konvektiivisessa sateessa auringon lämpö saa ilman kohoamaan ja jäähtymään, ja rintamasateessa kylmä ilmamassa pakottaa lämpimän ilmamassan kohoamaan ja jäähtymään. Jäähtyminen saa aikaan vesipisaroiden tiivistymisen. [Dingman, 2016, s. 87-154] Yleensä Suomessa kesäisin sataa lyhytkestoisemmin, mutta sateen voimakkuus on suurempi, ja talvella sade on heikompa, mutta pitkäkestoisempaa [Ilmatieteenlaitos, 2019].

Valunnalla tarkoitetaan järven valuma-alueelta painovoiman seurauksena valuvaa vettä [Leppäranta, 2017, s. 171-188]. Pienillä arktisella alueella sijaitsevilla järvillä valuma-alueelta saapuva vesi muodostaa merkittävän osan järveen saapuvasta vedestä. Suoran sadannan merkitys järveen on pienempi järven pienen koon vuoksi. [ko Woo et al., 1981]

Valunta voidaan jakaa kolmeen osaan pintavalunta, maavesivalunta ja pohjavesivalunta. Pintavalunnan suuruus riippuu paljon kasvillisuudesta ja maaperästä. Jos maan pinta on vettä huonosti läpäisevää, pintaveden virtaus on runsaampaa. [Leppäranta, 2017, s. 171-188] Osa vedestä imeytyy maahan ja jatkaa virtaustaan maan huokosissa. Virtausnopeus maavesivalunnassa on riippuvainen maan huokoisuudesta. Maavedestä osa valuu pohjaveteen. Huokoisuuden lisäksi on merkitsevää

sateen jatkuvuus ja voimakkuus. Jos sateet tai lumen sulaminen jatkuvat pitkään, maahuokokset voivat kyllästyä vedestä ja lisätä näin pintavirtausta. [Dingman, 2016, 303-360] Osa järvistä on pohjavesivaikutteisia, jolloin pohjavettä purkautuu järveen. [Uusitalo, 2019]

Haihdunnan määrä on riippuvainen saatavilla olevasta vedestä ja energiasta. Voidaan olettaa, että kesällä haihduntaa tapahtuu enemmän kuin talvella ja Etelä-Suomessa runsaammin kuin Pohjois-Suomessa. Valuma-alueella tapahtuva haihdunta vaikuttaa alueelta valuvan veden määrään, kun taas suoraan järvestä tapahtuva haihdunta voi vaikuttaa pinnan korkeuteen. [Leppäranta, 2017, s. 171-188] Sijainnin lisäksi haihdunnan voimakkuuteen vaikuttaa järven koko ja esimerkiksi tuulisuus [Blanken et al., 2011]. Haihduntaa tapahtuu niin pitkään kuin veden yläpuolinen ilma on kyllästynyt vesimolekyyleistä. Tämä vaatii, että haihtuneet vesimolekyylit pystyvät siirtymään pois veden pinnan läheltä ja pinnan tuntumassa on vajautta vesimolekyyleissä. [Strangeways, 2007, s. 57-130]

2.3 Vuodenaikojen vaikutus

Suomessa järvet ovat pääsääntöisesti dimiktisiä, eli täyskierto tapahtuu niissä kaksi kertaa vuodessa. Muuna aikana järvissä on vakaa kerrostuneisuus. Suomessa järviä peittää osan vuodesta jääkansi. Täyskierrot, jääkansi ja järvien kerrostuminen luovat vuosittaisen syklin, joka muuttaa olosuhteita järvissä.

2.3.1 Talvi

Jäätyminen alkaa, kun lämpöä siirtyy järvestä viileämpään ilmaan. Yhdessä tuulen sekoittavan vaikutuksen kanssa jäähtyminen aiheuttaa veden pintakerroksen lämpötilan laskemisen jäätymispisteeseen, mitä kuva 2.2a esittää. Ensijää muodostuu. Jään paksuuntuminen edellyttää, että lämpöä pääsee kulkeutumaan jään läpi ilma-

kehään, minkä ansiosta vesi jään alla pysyy jäätymispisteessä. [Kirillin et al., 2012] Jää itsessään toimii hyvänä lämpöeristeenä, ja jää pystyy kasvamaan rajallisesti. Jos jään päällä on lunta, eristävä vaikutus tehostuu. [Leppäranta et al., 2009]

Jääkansi eristää järven ilmasta, joten ilman ja järven välillä ei tapahdu aineiden vaihtoa talven aikana. Samoin jääkannen ansiosta tuuli ei pääse sekoittamaan pintaa, mutta sekoittumista kuitenkin tapahtuu jääkannen alla. [Leppäranta, 2015, s. 204-244]

Järven sedimenttiin kesällä varastoitunut lämpö vapautuu talven aikana lämmittäen vesimassaa kuten kuvasta 2.2b voidaan havaita, ja veden tiheys muuttuu. Lämmennyt vesi siirtyy omalle tiheystasolleen. Tämä voi käynnistää järvessä kahdessa solussa tapahtuvan kierron, jossa lämpenevä vesi valuu alaspäin ja syvemmillä lämmennyt vesi nousee ylöspäin. Sedimenttiin on varastoituneena ainoastaan rajallisesti lämpöä ja lämpövuoto ehtyy talven kuluessa. [Kirillin et al., 2012]

Auringon ja sedimentin lämpövuon lisäksi sekoittumiseen vaikuttavat seicheaallot, pohjaveden ja jokien virtaus sekä Coriolisvoima. Jääpeite ei vaikuta järven seiche-värähtelyyn, mutta virtausnopeudet voivat olla alhaisempia. [Kirillin et al., 2012] Coriolisvoiman merkitys pienissä järvissä on puolestaan vähäinen [Stepanenko et al., 2020].

Kuten pinnan energiataseessa mainittiin, albedolla on suuri merkitys lämpötasapainoon. Talvella merkittäväksi tekijäksi muodostuu lumi, joka heijastaa tehokkaasti saapuvaa säteilyä pois. [Kirk, 2011, 50-95] Talven aikana pinnan albedo vaihtelee lumen määrän ja jään paksuuden mukaan.

Jään albedo on pienempi kuin lumen, ja näin paljastuva jää sitoo voimakkaammin säteilyä. Lumen määrän jään pinnalla ollessa vähäinen esimerkiksi kevättalven sulamisen ansiosta, auringonvalo sitoutuu jäähän ja tuo lämpöä jään läpi. [Leppäranta, 2015, 68-69] Lämpenevä pintakerros muuttuu raskaammaksi ja vajoaa. Tämä saa aikaan konvektiota jään alapinnan läheisyydessä, kuten kuvasta 2.2c havaitaan.

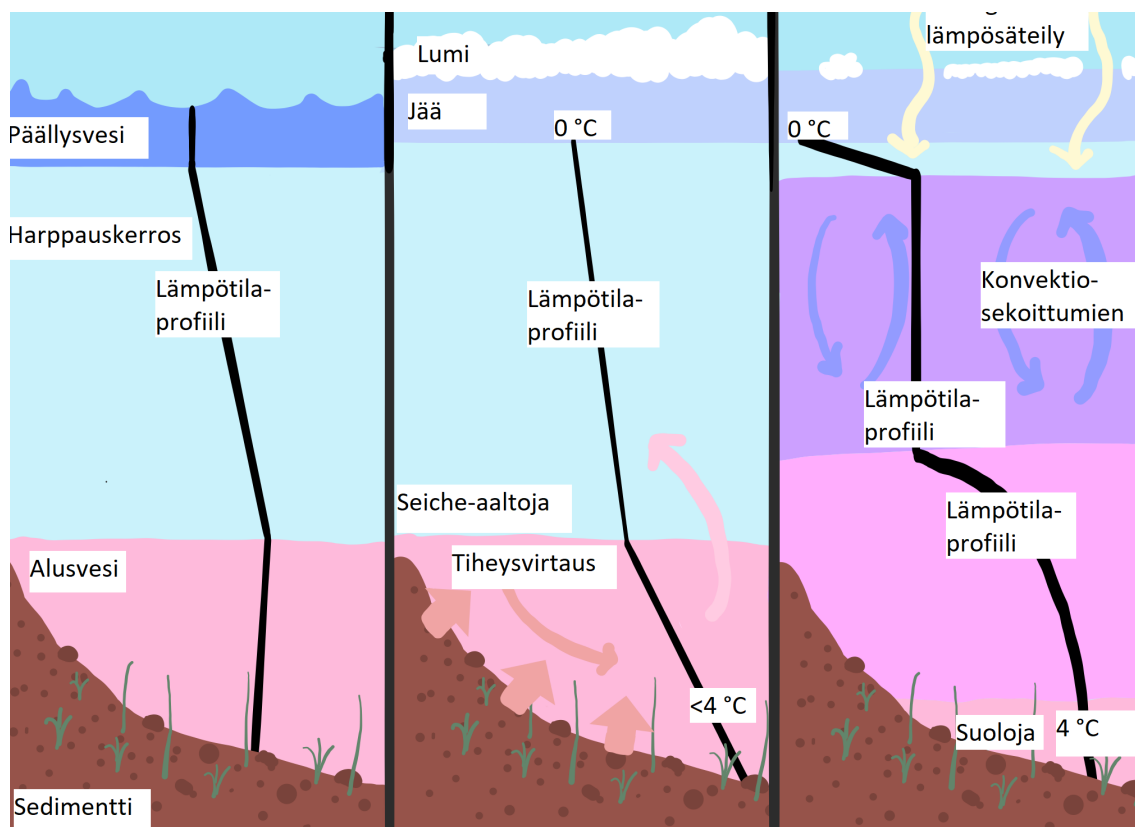
[Kirillin et al., 2012] Jää sulaa sekä yläpuolelta auringon lämmön ansiosta että alapuolelta veden lämmön ansiosta. Ohentuva jää päästää lävitseen yhä enemmän auringon säteilyä ja veden lämpötila kasvaa. Konvektio voimistuu päivä päivältä, ja lopulta keväinen täyskierto rikkoo talvikerrostuneisuuden. Kun jäät ovat sulaneet kokonaan, veden pintakerros lämpenee voimakkaammin ja kesäkerrostuneisuus alkaa muodostua. [Leppäranta, 2015, s. 91-136]

Kuten kuvista 2.2b ja c nähdään, järven kerrostuminen muuttuu jään muodostumisen jälkeen ja talven aikana. Veden lämpötila on suoraan jään alapuolella jäätymispisteessä. Jään alapuolella havaitaan talvitermokliini, jossa lämpötila nousee jäätymispisteestä muutaman asteen. Veden lämpötila nousee lähestyttäessä pohjaa, ja tihein neliasteinen vesi muodostaa alusveden. [Leppäranta, 2015, s. 204-244]

2.3.2 Kesä

Kesäkerrostuminen alkaa pian jäiden sulettua veden pintakerroksen lämmitessä, kun auringon lyhytaaltainen säteily ei sitoudu enää jään sulattamiseen. Poiketen talvesta tuulella on merkittävä vaikutus pinnan sekoittumiseen [Elo, 2007]. Kesän aikana pohjan sedimenttiin varastoituu lämpöä. Järven syvyys ja pinta-ala vaikuttavat vahvasti veden lämpötilaan ja kerrostuneisuuden muodostumiseen [Elo, 2007]. Matalissa järvissä kerrostuneisuutta ei välttämättä muodostu vuoden aikana, ja ne voivat olla isotermisiä [Gorham and Boyce, 1989, s. 233-245]. Kerrostuminen päättyy syksyllä, kun päällysvesi jäähtyy aiheuttaen koko järven syvyydellä tapahtuvan konvektion [Elo, 2007].

Suomessa kesän aikana järven lämpövarasto kasvaa keskimäärin heinäkuulle saakka [Eloranta, 1997, s. 27-33]. Järven syvyys vaikuttaa lämpötilavaraston suuruuteen, ja matalat järvet reagoivat näin nopeammin ilman lämpötilojen muutokseen. Ilman lämpötila, aurinko ja tuuli ovat merkittävimmät tekijät päällysveden lämpötilamuutoksissa kesällä. [Magee and Wu, 2017] Tuulen sekoittavan vaikutuk-



Kuva 2.2: Talven aikana järven termodynamiikkaan ja kerrostumiseen vaikuttavat tekijät. Kuva a) kuvaa ennen talvea tapahtuvaa sekoittumista sekä kerrostumisen alkua, b) kuvaa alkutalvea, kun lumi peittää jään ja sedimentistä vapautuu vielä lämpöä alusveteen ja c) kuvaa kevättalvea, kun aurinko pääsee vaikuttamaan jään alapuoliseen sekoittumiseen. [Kirillin et al., 2012]

sen ansiosta päälyysvesi on tasalämpöinen. Veden pinta on herkkä vuorokausittaiselle lämmön vaihtelulle. Vaihtelun suuruus riippuu sääoloista. Päivällä on yleensä havaittavissa aivan pintakerroksen lämpenemistä. Yöaikaan pinta jäähtyy, kun lämpimämpi järvi luovuttaa viileään yöilmaan lämpöä. Päälyysveden lämpötila riippuu saatavilla olevasta lämmöstä ja kerroksen paksuus pystysuoran sekoittumisen voimakkuudesta. [Leppäranta, 2017, s. 103]

Päälyysveden syvyyteen voivat tuulen ja saapuvan säteilyn lisäksi vaikuttaa veden optiset ominaisuudet. Liuenneen orgaanisen aineen määrä vaikuttaa veden

väriin. Kirkasvetiset järvet lämpenevät siis tummia syvemmältä ja päällysveden paksuus on syvempi kuin tummilla järvillä. Tummat järvet lämpenevät kuitenkin tehokkaammin pinnasta, josta lämpöä johtuu syvempiin kerroksiin. [Houser, 2006]

Talvella termokliini on hyvin lähellä jään pintaa, mutta kesän aikana termokliini siirtyy syvemmälle. Sen syvyys ja voimakkuus riippuvat pystysuunnassa tapahtuvan sekoittumisen voimakkuudesta. Kesän aikana muodostuva harppauskerros voi olla hyvinkin voimakas. Tämä estää päällysveden ja alusveden sekoittumista ja esimerkiksi hapen siirtymistä pinnalta pohjan tuntumaan. Kesän aikana termokliinin paikka yleensä vaihtelee. Termokliinilla on tapana syventyä kesän kuluessa, kun järvi lämpenee. [Beletsky et al., 2012]

Termokliinin alapuolella sijaitsee viileä alusvesi, mutta matalissa järvissä se voi puuttua. Alusvesi on yleensä kauttaaltaan lähes saman lämpöistä, ja siinä ei tapahdu voimakasta sekoittumista. Alusveden lämpötilaan voivat vaikuttaa esimerkiksi pohjassa olevat lähteet. Sekoittuminen riippuu järven sisäisistä virtauksista. [Leppäranta, 2017, s. 103]

2.3.3 Kevät ja syksy ovat täyskierron aikaa

Keväällä auringon säteily tunkeutuu jään läpi lämmittäen päällysvettä. Lämpeneminen käynnistää konvektion. Sopivissa oloissa kevään täyskierto voi tapahtua jään alla. Jään sulaminen järvissä sitoo paljon auringon säteilyenergiaa. Kun jääkansi on sulanut, auringosta saapuva energia sitoutuu veden pintakerrokseen ja päällysvesi lämpenee nopeasti. [Lerman, 1995]

Syksyllä lämpövuon pieneneminen jäähdyttää ilmaa ja vesi luovuttaa kesän aikana varastoitunutta lämpöä ilmaan. Pienissä järvissä jäähtyminen tapahtuu nopeammin pienemmän lämpövaraston vuoksi [Magee and Wu, 2017]. Pinnan lämpötilan laskiessa konvektio alkaa, kun jäähtynyt raskaampi vesi vajoaa. Konvektio murtaa lopulta kesän aikana syntyneen termokliinin ja järven kerrostunut rakenne

hajoaa. Tuulella on suuri merkitys syksyn täyskiertoon, ja jäähtyminen yhdessä sekoittumisen kanssa nopeuttavat kerrostuneisuuden hajoamista ja voivat pidentää täyskierron kestoja. [Eloranta, 1997] Täyskierrossa järvi sekoittuu alusvettä myöten kuten keväällä, mutta toisin kuin keväällä syksyn täyskierron aiheuttaa jäähtyminen. Syksyn täyskierto päättyy ennen kuin ensijää muodostuu järven pintaan. [Lerman, 1978, s.65-90]

3. Aineisto ja menetelmät

3.1 Värriön erämaa-alue

Värriön luonnonpuisto sijaitsee Itä-Lapissa Sallan kunnassa. Puisto on Venäjän rajan tuntumassa Tuntisan erämaa-alueen pohjoispuolella. Puisto perustettiin vuonna 1981 suojelemaan alueen runsasta lajistoa. Värriön alue kuuluu Metsä-Lappiin, ja se edustaa sekä tunturi- että metsäerämaaluontoa. Puiston kokonaispinta-ala on noin 125 km². [Ympäristöhallinto, 2019]

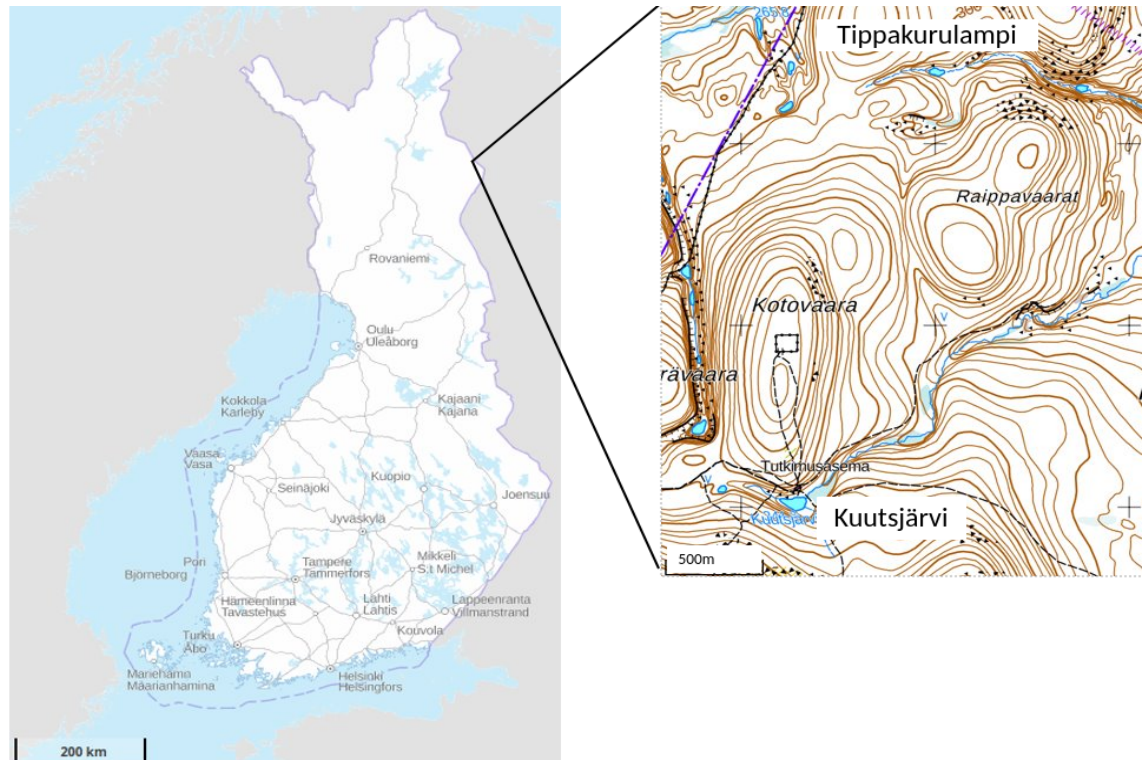
Värriön tutkimusasema on perustettu vuonna 1967 Erkki Pulliaisen johdolla. Tutkimusasemalla on vuosien saatossa kerätty runsaasti pitkiä aikasarjoja. Biologisia aikasarjoja on kerätty metsäkanalinnuista, hyönteisistä, petoeläimistä sekä esimerkiksi pönttöpesinnästä. Lisäksi asemalla mitataan lumilinjoja ja tehdään säähavaintoja. Aseman tutkimus monipuolistui ilmakehän tutkimukseen vuonna 1991, kun Kotovaaran laelle perustettiin ensimmäinen SMEAR-asema (Station for Measuring Ecosystem-Atmosphere Relations). Aseman tarkoituksena on tuottaa tietoa esimerkiksi ilmansaasteista, pienhiukkasten muodostumisesta sekä ympäristön vaikutuksesta aerosolien muodostumiseen. Lisänä aseman kalustoon perustettiin vuonna 2017 Kylmäasema Yli-Nuorttijoen varteen. Kylmäasemalla kerätään vesinäytteitä, tarkkaillaan joen sameutta sekä mitataan pienhiukkasia. [Helsingin yliopisto, 2020]

Kuutsjärvi (kuva 3.2) sijaitsee leveyspiirillä 67° 44'N ja pituuspiirillä 29° 36'E aivan tutkimusaseman vieressä. Jääkauden jälkeen sulamisvedet Värriötuntureiden

länsipuolisesta jääjärvestä ovat kaivertaneet Kuutsjärvestä kokoonsa nähden suhteellisen syvän ja järveä ympäröivät jyrkät rinteet. Rinteitä reunustavat kuuset, männyt ja tunturikoivut. Kuutsjärvi sijaitsee 341 metrin korkeudella merenpinnasta.

Järveen laskee tunturipuro, joka keväällä virtaa valtoimenaan ja kuivuu kesän mittaan riippuen vuodesta lähes kokonaan. Suurin osa järveen virtaavasta vedestä on peräisin lumien sulamisvesistä valuma-alueelta, jonka pinta-ala on $1\,413\,648\text{ m}^2$ [SYKE, 2020]. Järven itäpuolelta saa alkunsa Kuntasjoki, joka virtaa Kuntaskurusta kohti Venäjän rajaa. 1980-luvulla Kuutsjärveen istutettiin aikuisia taimenia läheisestä Ainijärvestä, ja kanta voi edelleenkin järvessä hyvin. Järvi oli luontaisesti kalaton ennen istutuksia. Kuutsjärvi on dimiktinen, eli siinä tapahtuu täyskierto kaksi kertaa vuodessa. Ravinteisuudeltaan järvi luetaan keskiravinteiseksi. Kuutsjärvessä on runsaasti fosforia maaperän suuren fosforipitoisuuden vuoksi, mutta se on typpirajoitteinen. Kuutsjärvi on kirkasvetinen, ja Secchi-syvyys järvessä onkin noin kahdeksan metriä. Järvi on syvimmillään noin kahdeksan metriä, ja sen pinta-ala on $6\,485\text{ m}^2$. [Milardi, 2015]

Tippakurulampi (kuva 3.3) sijaitsee Tippakurussa lampiketjussa, noin 2,5 kilometrin päässä Kuutsjärvestä. Lampi sijaitsee Kotovaaran ja Raippavaaran pohjoispuolella leveyspiirillä $67^\circ\,46'\text{N}$ ja pituuspiirillä $29^\circ\,37'\text{E}$. Lampi on Kuutsjärveä matalampi ja syvimmillään noin 5 metriä. Kuutsjärvi on pinta-alaltaan lähes kolme kertaa suurempi, ja Tippakurulammen pinta-ala on $2\,150\text{ m}^2$. Tippakurulampi saa vetensä valuma-alueelta, jonka pinta-ala on $194\,893\text{ m}^2$. Tippakurulampeen laskee vettä ympäröivältä suoalueelta, mutta varsinaisesti järvi ei ole kosketuksissa muihin vesistöihin [Milardi, 2015]. Kasvillisuudeltaan lampi sijaitsee mäntymetsässä, ja lammen ranta on suomaista. Secchi-syvyys Tippakurulamessa on 4,5 metriä [Milardi, 2015]. Tippakurulampea ympäröivät Kuutsjärven tavoin rinteet.



Kuva 3.1: Tippakurulampi ja Kuutsjärvi sijaitsevat Värriön luonnonpuistossa Itä-Lapissa. Värriön sääasema on aivan tutkimusaseman vieressä Kuutsjärven pohjoispuolella. Kartan alkuperä: Maanmittauslaitos, Karttapaikka <https://www.maanmittauslaitos.fi/asioi-verkossa/karttapaikka>



Kuva 3.2: Kuutsjärvi heinäkuussa 2019.



Kuva 3.3: Tippakurulampi heinäkuussa 2020.

3.2 Mittaukset

3.2.1 Termistoriketjut

Termistoriketjumittaukset ovat Jan Weckströmin julkaisematonta aineistoa. Termistoriketjujen avulla saatiin jatkuvaa aikasarjaa Kuutsjärven ja Tippakurulammen lämpötiloista. Molemmissa järvissä ketjuja oli yksi järven syvimässä kohdassa. Lämpötilaa mitattiin Kuutsjärvestä aikavälillä 30.5.2009–8.8.2012 ja Tippakurulamesta 15.4.2010–8.8.2012. Ketjujen yläpäässä oli poiju, joka piti ketjun suorana. Kuutsjärvessä ensimmäinen termistori oli kahdenkymmenen cm:n syvyydellä pinnasta ja loput termistorit kahden metrin välein. Tippakurulamessa ensimmäinen termistori oli myös kahdenkymmenen cm:n syvyydessä, mutta loput yhden metrin välein. Molemmissa ketjuissa oli viisi termistoria. Ketjut olivat ankkuroituneena painolla järven pohjaan.

Termistorit tallensivat järven lämpötilaa kahden tunnin välein. Mittausten avulla havainnollistetaan Tippakurulammen ja Kuutsjärven päivittäisiä muutoksia, vuorokauden keskilämpötilaa sekä kuukauden keskilämpötiloja eri syvyyksillä. Lisäksi saatujen lämpötilojen avulla laskettiin Kuutsjärven ja Tippakurulammen veden tiheys täyskierron aikana vedentiheyden yhtälöä 2.1 käyttäen.

3.2.2 Sää- ja lumihavainnot

Värriön tutkimusaseman vieressä Kotovaaran juurella (kartta 3.1) sijaitsee Ilmatieteenlaitoksen sää- ja havaintoasema. Tutkielmassa käytetyt säähavainnot ovat peräisin asemalta. Sääanturit sijaitsevat kahden metrin korkeudessa.

Suurin osa havaintoaseman mittauksista on automaattisia. Lämpötilamittarin ympärillä on kaappi, joka suojaa anturia tuulen ja sateen vaikutukselta. Anturi mittaa ilman lämpötilaa kymmenen minuutin välein. Tässä tutkielmassa on käytetty myös Ilmatieteen laitoksen tietokannasta saatavia vuorokauden ja kuukauden

keskilämpötiloja.

Aseman työntekijät tekevät osan havainnoista päivittäin. Esimerkiksi sadan-
nan määrä ja lumen syvyys varmistetaan joka aamu. Lumen syvyysmittausta varten
asemalla on mittakeppi. Lumen syvyys luetaan lumikepin asteikolta vaakatasossa.

Aseman työntekijät seuraavat myös Kuutsjärven jäiden lähtöä ja jäätymistä.
Jään sulamis- ja lähtöajankohdat on kerätty aseman paperisista arkistoista. Sula-
mispäiväksi on laskettu ensimmäinen täysin jäätön päivä Kuutsjärvessä ja jäätymis-
päiväksi se päivä, jolloin koko järvi on saanut jääkannen. Päivämäärien kirjaaminen
on toisinaan unohtunut, joten päivämäärät ovat suuntaa antavia.

3.3 Värriön ilmasto

Lapin ilmastoa määrittävät pitkälti Pohjois-Atlantti sekä Siperian suuret maa-alueet.
Idästä saapuvat korkeapaineet muuttavat ilmaa mannermaisemmaksi, ja Jäämeri
tasoittaa lämpötilojen vaihtelua. Köppen on luokitellut Suomen kuuluvan lumi- ja
metsäilmastoon, jossa on tyypillisesti kylmät ja runsassateiset talvet. Värriön luon-
nonpuisto sijaitsee Itä-Lapissa. Ilmasto on mantereisempi, ja siinä on havaittavissa
viitteitä Kuolan niemimaan ilmastoon. [Autio and Heikkinen, 2002]

[Ympäristöhallinto, 2019]

Värriön tunturit vaikuttavat ilman lämpötilaan alueellisesti. Lämpötilainver-
sion seurauksena tuntureiden rinteellä on talvella lämpimämpää kuin laaksoissa,
koska raskas kylmä ilma laskeutuu laaksoon. Inversiota voi tapahtua myös kesäisinä,
jolloin rinteitä pitkin valuu kylmää ilmaa laaksoon. [Autio and Heikkinen, 2002]

Keskilämpötila on Värriössä nollan alapuolella lokakuusta huhtikuuhun. Kyl-
mintä on tammi- ja helmikuussa, jolloin keskilämpötila on alle $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$. Toukokuusta
syyskuuhun keskilämpötila on $8,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja lämpimin kuukausi on heinäkuu, jolloin
keskilämpötila on yli $11\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lumi sataa maahan lokakuun aikana, ja lumipeitteen
syvyys kasvaa huhtikuuhun asti. Lumipeite sulaa usein nopeasti huhti- ja touko-

Taulukko 3.1: Kuutsjärven sulamis- ja jäätymispäivät vuosilta 2009–2012. Sulamis-päivällä tarkoitetaan ensimmäistä päivää, jolloin järvi on täysin jäätön, ja jäätymis-päivällä päivää, jolloin järvi on jäätynyt kokonaan.

Kuutsjärven sulaminen	Kuutsjärvi jäättyi
26.5.2009	3.10.2009
26.5.2010	25.10.2010
27.5.2011	10.11.2011
27.5.2012	21.10.2012

kuun aikana. Kuutsjärvi jäätyy lokakuussa ja sulaa toukokuun lopussa tai kesäkuun alussa. Kuutsjärven jäätymis- ja sulamisajankohdat on esitetty taulukossa 3.1.

4. Tulokset

4.1 Päivittäisten vaihteluiden eroavaisuudet

Kuutsjärvessä ja Tippakurulammissa päivittäinen vaihtelu kesäkuussa on voimakkainta 20 cm:n syvyydellä ja selkeä päiväsykli on havaittavissa. Lämpötila nousee molemmissa järvissä päivän aikana, ja päivän maksimilämpötila saavutetaan kesäkuussa 0,2 metrin syvyydellä kello 16–20. Järvien minimilämpötila saavutetaan aamulla noin kello 04–06. Kuutsjärven ja Tippakurulammen päivittäisen vaihtelun amplitudin kuukausikeskiarvot ovat esitettyinä taulukossa 4.1. Päivittäisen vaihtelun suuruus riippuu ilman lämpötilan muutoksista. Vuosien 2010–2012 välillä on vaihtelua järvien lämpötiloissa. Kesäkuussa ja lokakuussa päivittäiset muutokset Tippakurulammissa ja Kuutsjärvessä eivät juurikaan poikkea toisistaan 0,2 metrin syvyydellä.

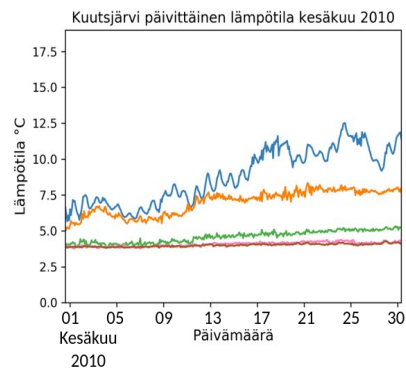
Kuutsjärvessä vaihtelu vaimenee huomattavasti syvemmillä, ja kahden metrin syvyydellä vaihtelun suuruus on kesäkuussa enää alle 0,4 °C ja lokakuussa 0,08 °C (taulukko 4.1). Kuuden ja kahdeksan metrin syvyydellä on havaittavissa pientä lämpötilan vaihtelua päivittäin. Tippakurulammissa päivittäinen vaihtelu on 0,8 °C vaimeampaa kahden metrin syvyydellä kesäkuussa kuin Kuutsjärvessä. Tippakurulammissa kolmessa ja neljässä metrissä vaihtelu on hyvin vähäistä ja lämpötila pysyy melko vakaana pinnan lämpötilavaihteluista huolimatta.

Lokakuun mittauksia tarkasteltaessa vuosilta 2010 ja 2011 samanlaista päi-

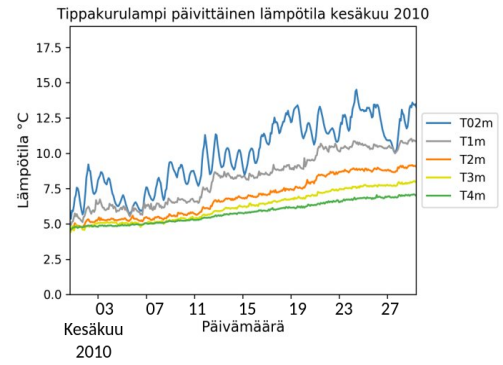
Taulukko 4.1: Taulukossa esitettynä Kuutsjärven ja Tippakurulammen päivittäisen vaihtelun amplitudien kuukausikeskiarvot 0,2 ja kahden metrin syvyydellä.

vuosi		Kuutsjärvi		Tippakurulampi	
		0,2m	2m	0,2m	2m
2010	kesäkuu	0,5 °C	0,28 °C	0,91 °C	0,17 °C
	lokakuu	0,13 °C	0,08 °C	0,15 °C	0,07 °C
2011	kesäkuu	1,12 °C	0,4 °C	1,36 °C	0,16 °C
	lokakuu	0,12 °C	0,08 °C	0,2 °C	0,07 °C
2012	kesäkuu	0,85 °C	0,34 °C	0,91 °C	0,12 °C

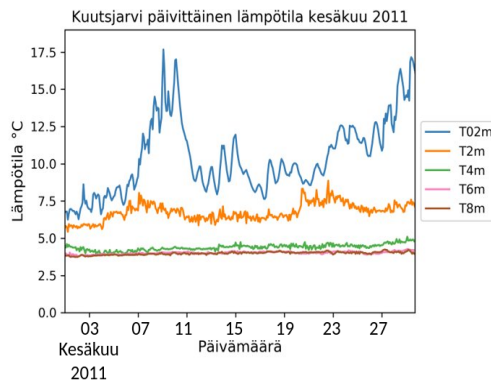
vittäistä lämpötilasykliä ei ole havaittavissa kuin kesäkuussa (kuva 4.2). Päivittäisen lämpötilavaihtelun kuukauden keskiarvo on lokakuussa vähintään 0,4 °C kesäkuuta pienempi. Lämpötilakehitys molemmissa järvissä on hyvin samankaltaista. Molempina vuosina Tippakurulammen lämpötila on korkeampi kuin Kuutsjärven lokakuun alussa ja Tippakurulampi on saavuttanut saman lämpötilan kaikilla syvyyksillä. Lämpötila laskee molempina vuosina Tippakurulammessa Kuutsjärveä voimakkaammin.



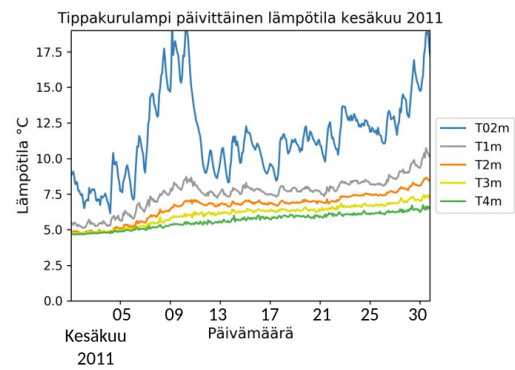
(a)



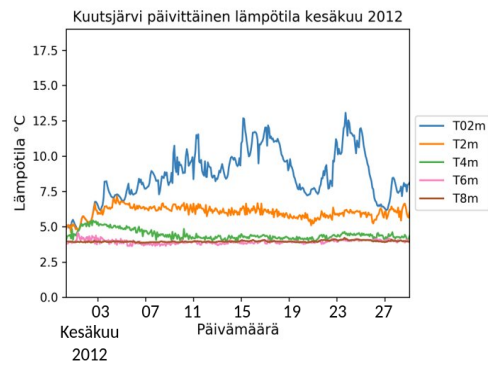
(b)



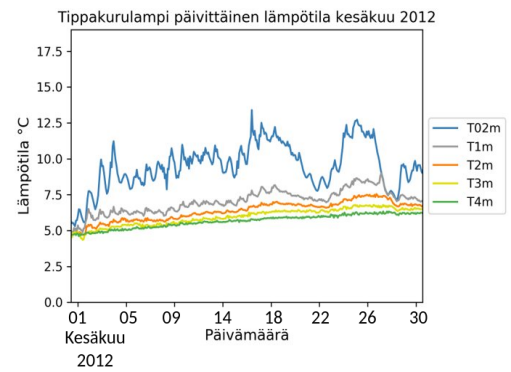
(c)



(d)

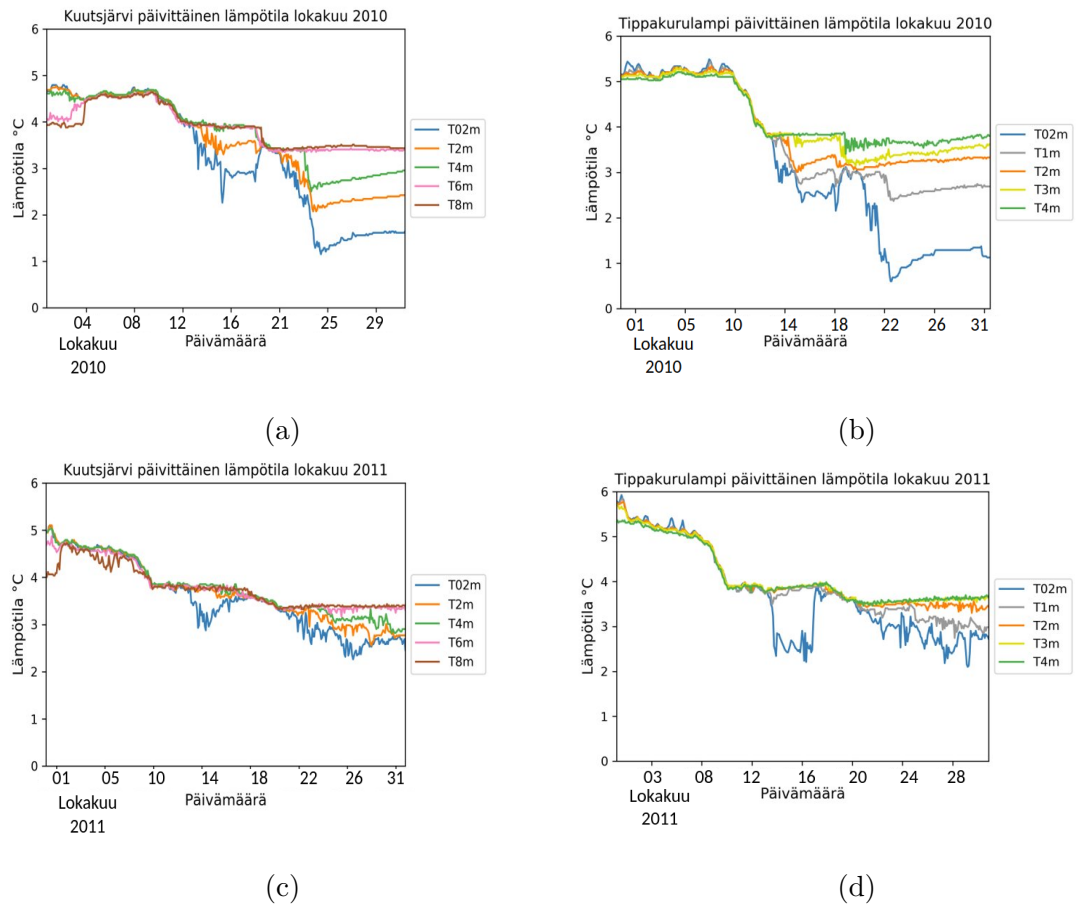


(e)



(f)

Kuva 4.1: Kuutsjärven ja Tippakurulummen lämpötila kesäkuussa 2010, 2011 ja 2012



Kuva 4.2: Kuutsjärven ja Tippiakurulammin lämpötila lokakuussa 2010 ja 2011

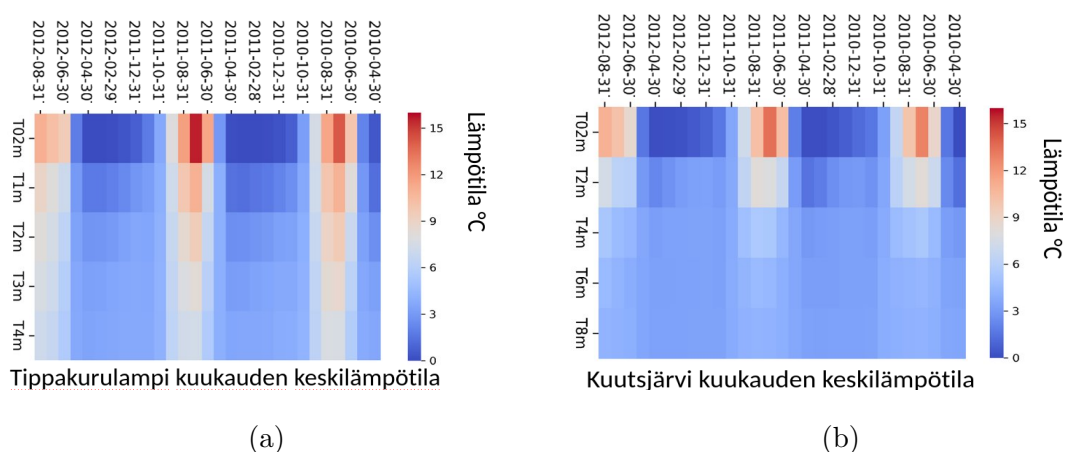
4.2 Tippiakurulammin ja Kuutsjärven kuukausittaiset lämpötilaerot

Kesän aikana, erityisesti heinäkuussa Tippiakurulammin kuukauden keskilämpötila on korkeampi kuin Kuutsjärven. Tämä nähdään kirkkaan punaisena palkkina kuvassa 4.3a, kun taas Kuutsjärven heinäkuun lämpötilat jäävät vaaleanpunaiksi (kuva 4.3b). Lämpötilaprofileista (kuva 4.4) havaitaan, että Tippiakurulammin pintalämpötila on heinäkuussa 2011 yhden °C:n korkeampi kuin Kuutsjärven. Tippiakurulan alusveden lämpötila on 3,3 °C korkeampi kuin Kuutsjärven. Tippiaku-

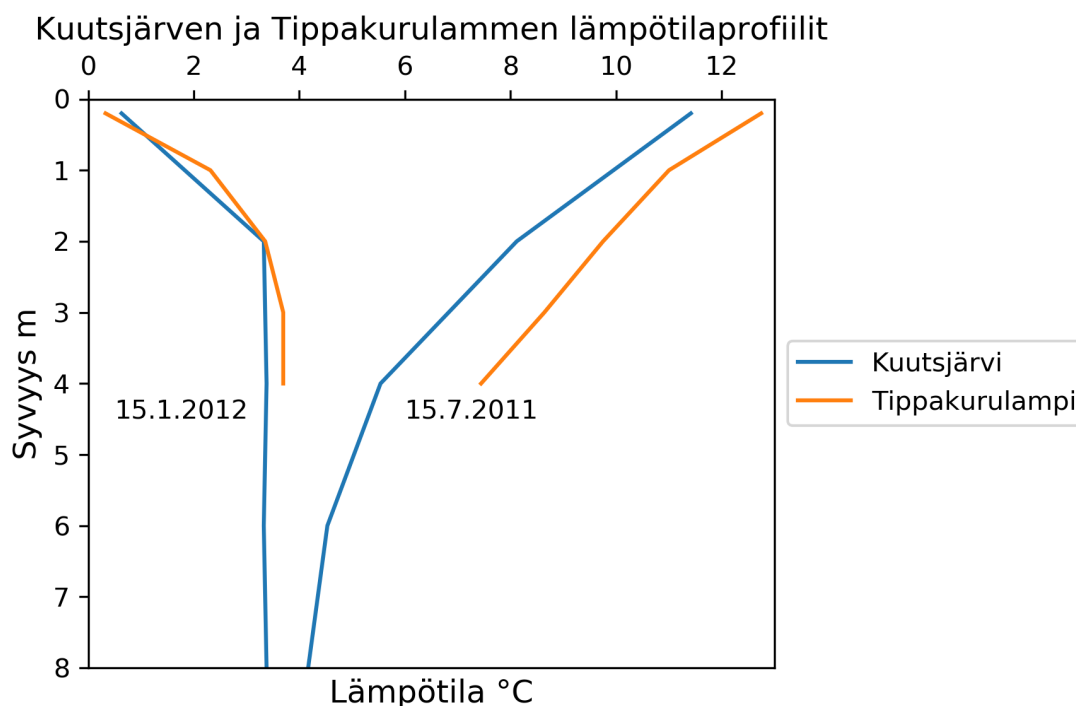
rulammen ja Kuutsjärven kuukauden keskilämpötilat eroavat kaikilla syvyyksillä voimakkaimmin kesän aikana.

Talvella lämpötilaerot järvien välillä ovat pienemmät. Tammikuussa 2012 Tippakurulammen lämpötila on 0,3 °C matalampi 20 cm:n syvyydellä kuin Kuutsjärven. Neljän metrin syvyydellä Tippakurulampi on 0,3 °C lämpimämpi (kuva 4.4).

Kuukauden keskilämpötila nousee Tippakurulammissa kaikilla syvyyksillä kesän aikana. Kuvasta 4.4 Tippakurulammen alusveden lämpötilaero heinä- ja tammikuun välillä on 3,7 °C. Toisin kuin Tippakurulammissa, Kuutsjärven veden lämpötila ei juurikaan nouse kesän aikana enää neljän metrin syvyydellä. Kahdeksan metrin syvyydellä Kuutsjärven kuukauden keskilämpötila vaikuttaa pysyvän lähes vakaana ympäri vuoden. Kuutsjärven ero heinä- ja tammikuun välillä on 0,8 °C. Lämpötilamuutokset Tippakurulammissa ovat siis Kuutsjärveä voimakkaampia.



Kuva 4.3: Kuutsjärven ja Tippakurulammen kuukauden keskilämpötila



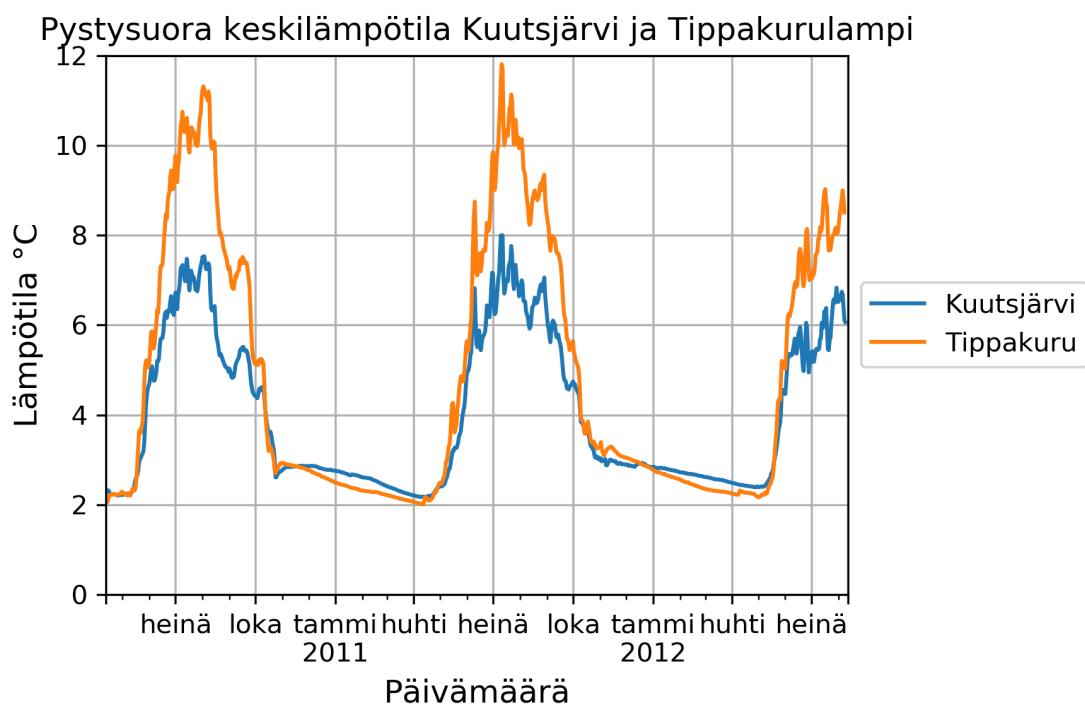
Kuva 4.4: Kuutsjärven ja Tippakurulammen lämpötilaprofiilit 15.7.2011 ja 15.7.2012. Sinisellä piirrettynä Kuutsjärvi ja oranssilla Tippakurulammen profiili.

4.3 Pystysuoran keskilämpötilan eroavaisuudet

Kesällä 2010 Tippakurulammen ja Kuutsjärven pystysuorakeskilämpötila on korkeimmillaan elokuussa. Tippakurulammen maksimilämpötila on 11,3 °C ja Kuutsjärven 7,5 °C (kuva 4.5).

Vuoden 2011 alhaisin lämpötila saavutetaan molemmissa järvissä huhtikuun aikana. Kuutsjärven keskilämpötila huhtikuussa on 2,2 °C ja Tippakurulammen kaksi °C. Kesän 2011 korkein keskilämpötila saavutetaan molemmissa järvissä heinäkuussa, jolloin Tippakurulammen keskilämpötila on 11,8 °C ja Kuutsjärven kahdeksan °C. Keväällä 2012 alhaisin keskilämpötila saavutetaan toukokuussa, jolloin Tippakurulammen keskilämpötila on 2,2 °C ja Kuutsjärven 2,4 °C.

Kuten kuvasta 4.5 havaitaan, Tippakurulammen keskilämpötila nousee touko- ja kesäkuun aikana Kuutsjärveä voimakkaammin. Tippakurulammen keskilämpötila on kaikkina kesinä korkeampi kuin Kuutsjärven, samoin maksimilämpötila. Suurimmillaan lämpötilaero on heinäkuussa 2011 neljä °C. Syksyllä jäähtyminen on voimakkaampaa Tippakurulammissa. Tammikuusta huhtikuuhun Kuutsjärven keskilämpötila on Tippakurulampea noin puoli °C korkeampi. Vuoden alhaisin keskilämpötila saavutetaan molemmissa järvissä huhti-toukokuun vaihteessa ennen täyskiertoa. Tippakurulammissa minimi keskilämpötila on noin 0,2 °C Kuutsjärveä matalampi.



Kuva 4.5: Kuutsjärven ja Tippakurulammen pystysuora keskilämpötila vuosina 2010–2012. Sinisellä piirrettynä Kuutsjärvi ja oranssilla Tippakurulampi.

Vaikka Tippakurulammen pystysuorakeskilämpötila kohoaa Kuutsjärveä korkeammaksi kesän aikana, on Kuutsjärven lämpövarasto suurempi kuin Tippakurulammen. Syvempi Kuutsjärvi varaa enemmän lämpöä kuin matalampi Tippakurulampi.

lampi.

4.4 Täyskierto

4.4.1 Täyskierron ajankohta

Taulukossa 4.2 on esitetty Kuutsjärven ja Tippakurulammen kevään ja syksyn täyskiertojen ajankohdat vuosina 2010–2012 sekä järvien keskilämpötilat täyskierron alussa ja lopussa. Kevään täyskierrat ovat molemmissa järvissä nopeita, alle viiden päivän mittaisia. Kevään täyskierrat tapahtuvat molemmissa järvissä lähes samaan aikaan. Kuutsjärvessä kevään täyskierto kestää Tippakurulampea muutama päivän pidempään.

Syksyn täyskierto alkaa Tippakurulammessa ja Kuutsjärvessä tarkasteluvuosina syyskuun lopulla. Kokonaisuudessaan Tippakurulampi pysyy syksyllä Kuutsjärveä pidempään sekoittuneessa tilassa.

4.4.2 Veden tiheys täyskierron aikana

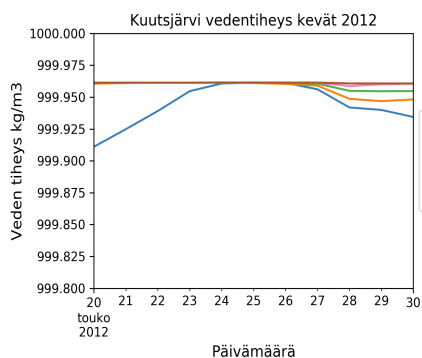
Veden tiheys ennen kevään täyskiertoa on kaikilla muilla syvyyksillä paitsi päällysvedellä sama (kuva 4.6). Päällysveden tiheys kasvaa, kunnes saavuttaa saman tiheyden muiden kerrosten kanssa. Kuutsjärven ja Tippakurulammen keskilämpötiloissa on alle 0,6 °C:n ero kevään täyskierron aikana (taulukko 4.2). Kevään täyskierron aikana veden tiheys on molemmissa järvissä lähes sama ja veden tiheys ei muutu (kuva 4.6).

Syksyn täyskierron aikana veden tiheys on Kuutsjärvessä kevään täyskiertoa korkeampi, kuten kuvasta 4.7 havaitaan. Veden tiheys ei muutu Kuutsjärvessä syksyn täyskierron aikana ja veden keskilämpötila laskee enintään 1,5 °C. Sen sijaan Tippakurulammessa täyskierto alkaa alemmalla veden tiheydellä ja vedentiheys nousee 0,05 kg/m³ täyskierron aikana. Tippakurulammen vesimassa jäähtyy

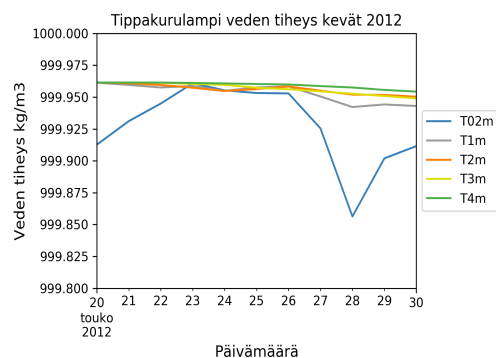
Taulukko 4.2: Taulukossa esitettynä Kuutsjärven ja Tippakurulammen täyskierron ajankohdat vuosina 2010–2012 sekä järvien keskilämpötilat kierron alussa ja lopussa.

	2010 kevät	syksy	2011 kevät	syksy	2012 kevät
Kuutsjärvi	23.-28.5.	28.9.-16.10	23.-27.5.	30.9.-25.10	23.-27.5.
T[°C] alussa	3,1	4,5	3,5	4,7	3,4
T[°C] lopussa	4,2	3,6	4,0	3,2	4,0
Tippakurulampi	23.-26.5.	25.9.-15.10.	15.-16.5. ja 21.-23.5.	19.9.-27.10.	23.-25.5.
T[°C] alussa	3,7	6,4	4,2	6,7	4,1
T[°C] lopussa	4,7	3,4	4,5	3,3	4,3

yli kolme °C sekoittuneessa tilassa.

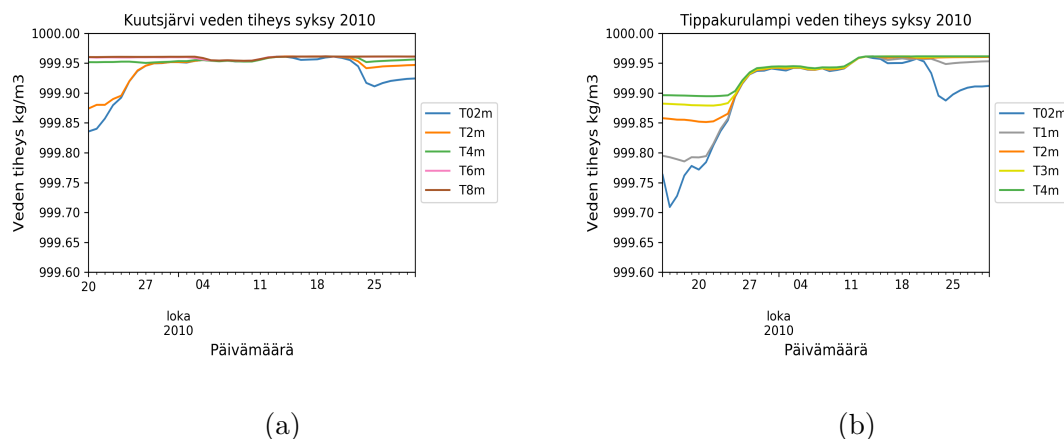


(a)



(b)

Kuva 4.6: Kuutsjärven ja Tippakurulummen tiheys kevään 2012 täyskierron aikana.



Kuva 4.7: Kuutsjärven ja Tippakurulummen tiheys syksyn 2010 täyskierron aikana.

4.5 Vuosittaiset lämpötilavaihtelut

Jääkannen muodostuessa (taulukko 3.1) Kuutsjärven lämpötila 20 cm:n syvyydellä on laskenut 1,5 °C:seen. Kuutsjärvi jäätyy kerrostuneena. Kuutsjärvessä ja Tippakurulammessa veden lämpötila nousee 20 cm:n syvyydessä heti jääkannen muodostumisen jälkeen. Pinnan lämpötila alkaa laskemaan marraskuun aikana, kuten kuvista 4.8 ja 4.9 nähdään. Molemmissa järvissä pinnan lämpötila laskee helmimaaliskuulle saakka lähelle jäätyispistettä. Tämän jälkeen pinnan lämpötilassa ei tapahdu muutoksia ennen kevään lämpenemistä.

Kuutsjärvessä veden lämpötila nousee yhden °C kahden metrin syvyydellä talvella 2010 (kuva 4.10). Tippakurulammessa lämpenemistä on havaittavissa kahden metrin syvyydellä talvella 2010–2011 sekä metrin syvyydellä molempina talvina. Lämpötilan nousu Tippakurulammessa on Kuutsjärveä heikompaa.

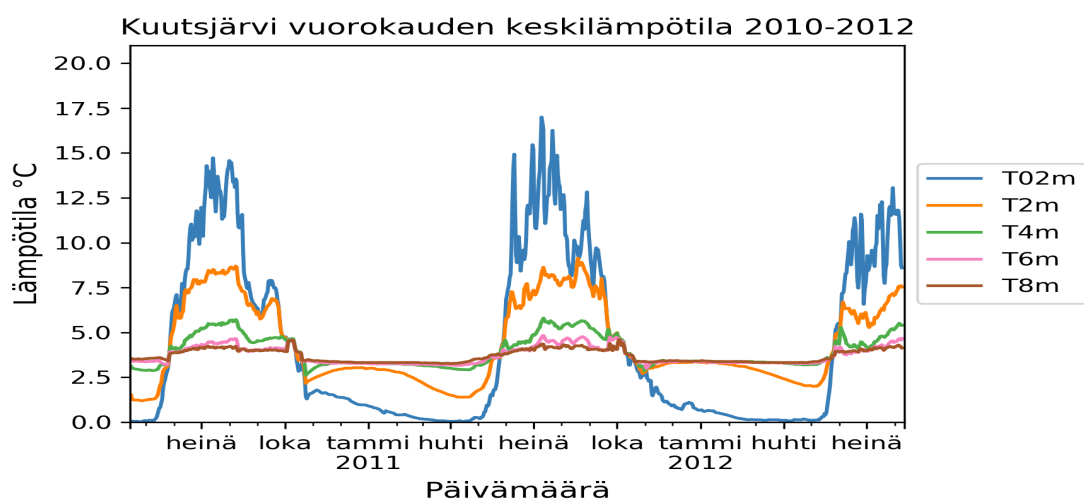
Kuvasta 4.10 nähdään, että neljän metrin syvyydellä lämpötila nousee Kuutsjärvessä yhden °C:n alkutalvesta 2010–2011. Talvella 2011–2012 lämpenemistä ei tapahdu neljän metrin syvyydellä Kuutsjärvessä tai Tippakurulammessa. Kuutsjärvessä lämpötila laskee 0,1 °C kuudessa metrissä ja 0,2 °C alkutalvesta 2010. Lämpöä

siirtyy siis syvältä ylempiin kerroksiin.

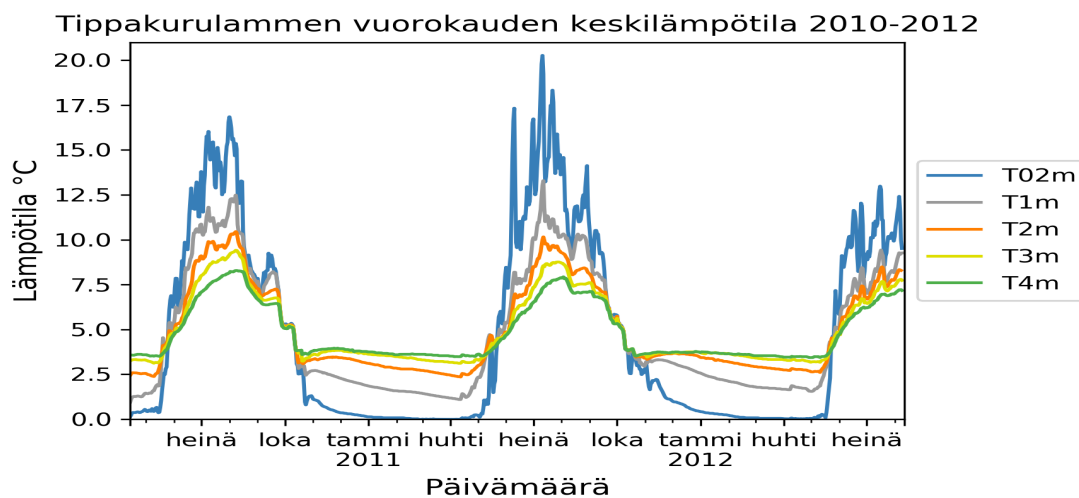
Jään sulamisen jälkeen pinnan lämpötila nousee nopeasti molemmissa järvissä. Tippakurulammissa lämpötilan nousu on nopeampaa, mikä havaitaan vaikkapa keskilämpötilan kuvassa 4.5. Lämpötilan nousu jatkuu pääsääntöisesti heinä- ja elokuun vaihteeseen saakka, jonka jälkeen pinnan lämpötila alkaa laskea. Viikoittainen vaihtelu päällysveden lämpötilassa on voimakasta, yli viisi °C vuorokaudessa.

Lämpenemistä tapahtuu molemmissa järvissä myös kahden metrin syvyydellä. Tippakurulammissa lämpötilan nousu kahden metrin syvyydellä on Kuutsjärveä kaksi °C suurempaa. Molemmissa järvissä voimakkaammat päällysveden lämpötilan muutokset näkyvät myös kahden metrin syvyydellä, mutta vaimeampina.

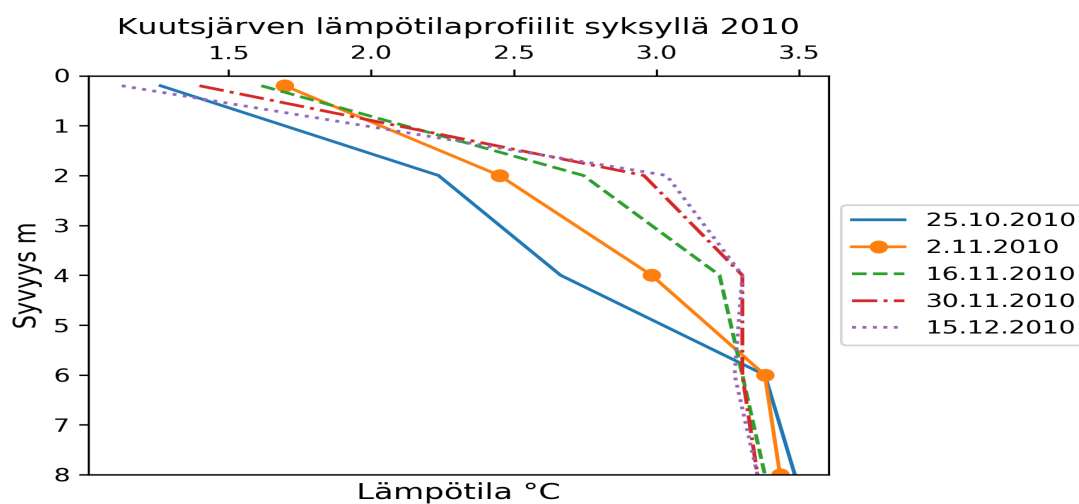
Kuutsjärvessä lämpötila nousee neljän metrin syvyydellä noin yhden °C:n kesän aikana, mutta Tippakurulammissa lämpenee jopa kolme °C. Suuremmalla Kuutsjärvellä lämpeneminen on siis hitaampaa. Kuuden ja kahdeksan metrin syvyydellä ei Kuutsjärvessä tapahdu kesän aikana juurikaan muutosta (kuva 4.8). Kaikkina tarkastelukesinä lämpötila Kuutsjärven alemmissa termistoreissa pysyy neljässä °C:ssa.



Kuva 4.8: Kuutsjärven lämpötila vuosina 2010-2012.



Kuva 4.9: Tippakurulammen lämpötila vuosina 2010-2012



Kuva 4.10: Kuutsjärven lämpötilaprofiili syksyllä 2010. Jääkansi muodostui 25.10.2010.

4.6 Pohjan vaikutus

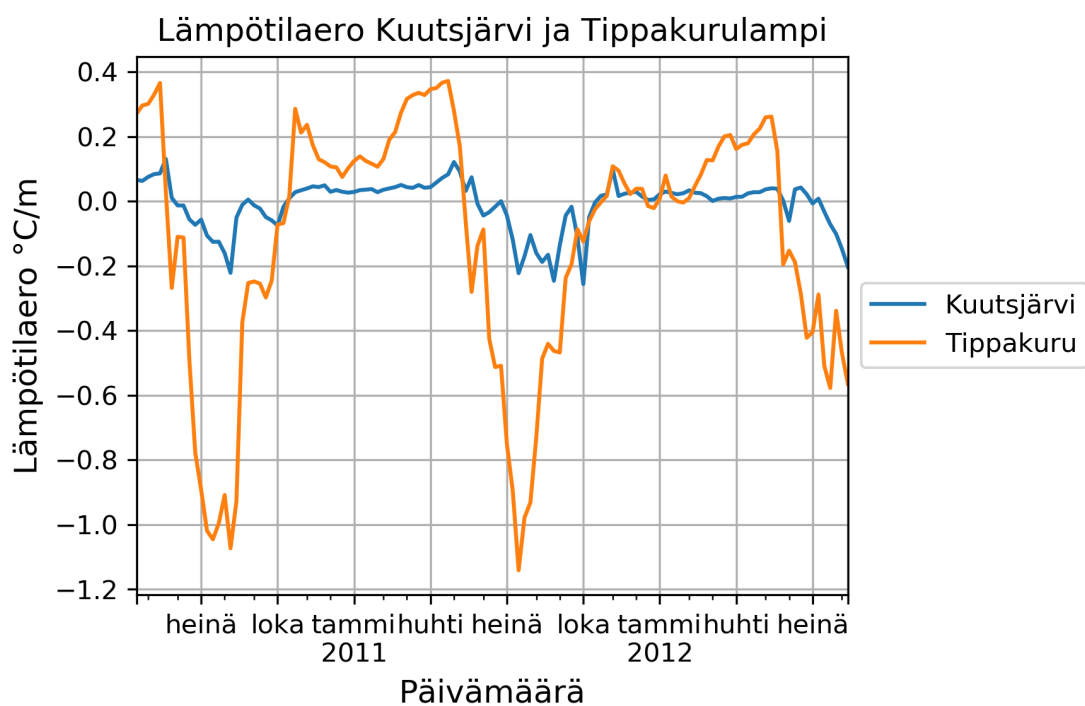
Tarkastellaan pohjan vaikutusta järven lämpötiloihin laskemalla lämpötilaero kahden syvimmän termistorin välille molemmissa järvissä. Kuutsjärvessä lämpötilaero on laskettu kahdeksan ja kuuden metrin sekä Tippakurulammissa neljän ja kolmen metrin syvyydessä oleville lämpötila-antureille. Lämpötilaerot on esitetty metriä

kohden kuvassa 4.11.

Pääsääntöisesti lämpötilaero on Kuutsjärvessä pieni, alle $0,21\text{ }^{\circ}\text{C}$ metriä kohden ympäri vuoden. Tippakurulammissa lämpötilaero on voimakkain kesäisin, yli $^{\circ}\text{C}$:n. Toukokuusta lokakuuhun lämpötilaero on molemmissa järvissä negatiivinen, kuten kuvasta 4.11 voidaan havaita. Tämä tarkoittaa, että ylemmän anturin lämpötila on alempaa korkeampi.

Täyskierron jälkeen lokakuussa tilanne kääntyy toisin päin, jolloin lämpötilaero on positiivinen. Tällöin alemman anturin lämpötila on ylempää korkeampi. Molemmat käyrät ohittavat nollan sekä keväisin että syksyisin lähes samaan aikaan. Lämpötilaero kasvaa erityisesti Tippakurulammissa talven aikana. Lämpötilaero on molemmissa järvissä talven aikana kesää pienempi. Kuutsjärvessä ero on alle $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja Tippakurulammissa alle $0,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ metriä kohden.

Kuten kuvasta 4.11 havaitaan, Kuutsjärvessä vaihtelua vuoden aikojen välillä on vähän. Kesän ja talven välillä eroa on $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ metriä kohden. Tippakurulammissa ero kesän ja talven välillä on suurimmillaan yli $1,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ metriä kohden. Lämpövarasto Tippakurulamman pohjassa on siis Kuutsjärveä aktiivisempi.



Kuva 4.11: Kuutsjärven ja Tippakurulammen lämpötilaero kahden syvimmän termistorin välillä vuosina 2010–2012. Alemman anturin lämpötilasta on vähennetty ylemmän anturin lämpötila eli Kuutsjärvessä $T(8\text{m})-T(6\text{m})$ ja Tippakurulammissa $T(4\text{m})-T(3\text{m})$. Lämpötilaero on laskettu viikon keskilämpötilasta. Sinisellä piirrettynä Kuutsjärvi ja oranssilla Tippakurulampi.

4.7 Lumen syvyyden vaikutus Kuutsjärven lämpenemiseen keväällä

Keväällä 2010 lumipeitteen paksuus maastossa vaihtelee 90 ja 60 cm:n välillä maaliskuun aikana (kuva 4.12). Tänä aikana Kuutsjärven pintalämpötilassa 20 cm:n syvyydellä ei tapahdu merkittävää muutosta. Kuutsjärven pintalämpötila alkaa nousta kevyesti huhtikuun puolivälin jälkeen, vaikka lumen syvyys maastossa on vielä yli 40 cm. Toukokuun 2010 alussa lumen syvyys laskee nopeasti, ja toukokuun 13. päivän jälkeen viimeisetkin lumet sulavat maastosta. Lumen sulamisen jälkeen Kuutsjärven lämpötila 20 cm:n syvyydellä nousee kahden viikon aikana kuusi °C (kuva 4.12). Samoin lämpötila alkaa nousta muillakin syvyyksillä toukokuun kymmenennen päivän jälkeen. Kuutsjärvi on jäätön toukokuun 26. päivä, vain noin kaksi viikkoa lumen sulamisen jälkeen.

Maaliskuussa 2011 lumipeitteen paksuus on edellistä vuotta matalampi. Lumen paksuus pysyttelee huhtikuun alkuun saakka 60 cm:ssä, ja tänä aikana Kuutsjärven lämpötilassa ei tapahdu muutoksia 20 cm:n syvyydellä. Kuvasta 4.13 havaitaan lumen syvyyden lähtevän laskuun huhtikuun puolivälissä ja muutoksia pintalämpötiloissa tapahtuu huhtikuun lopussa. Viimeisetkin lumet sulavat maastosta toukokuun seitsemännen päivän jälkeen. Kuutsjärven lämpötilan nousu 20 cm:n syvyydellä nopeutuu. Kuutsjärven viimeisetkin jäät sulavat toukokuun 27. päivä.

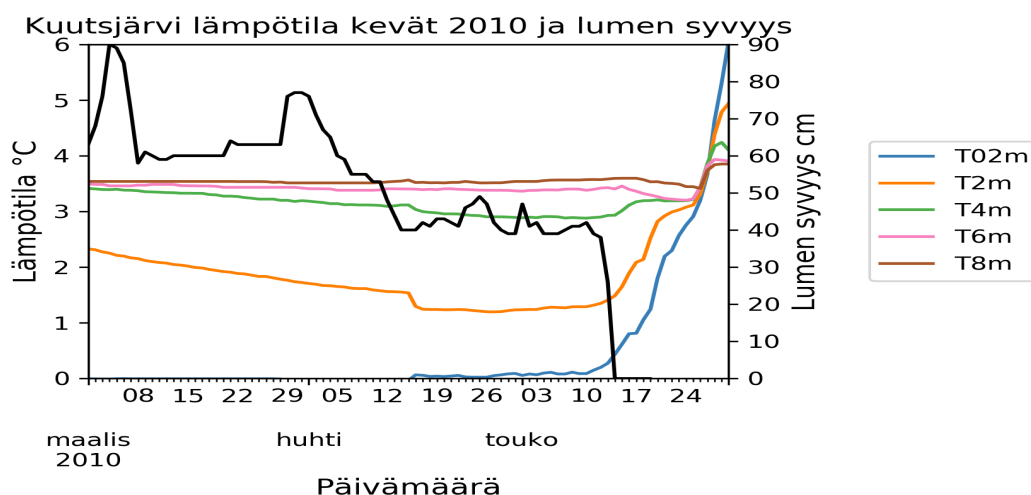
Lumen syvyys maaliskuussa 2012 on alle 60 cm, mutta kasvaa huhtikuun loppuun saakka. Lumipeitteen paksuuntumisen aikana Kuutsjärven pintalämpötila ei muutu (kuva 4.14). Toukokuun puolivälissä lumipeite sulaa kokonaan maastossa. Kuutsjärven lämpötila 20 cm:n syvyydellä lähtee nousuun. Pintalämpötila nousee nopeasti toukokuun loppua kohden, kahdessa viikossa 5,5 °C. Kuutsjärvi on jäätön toukokuun 27. päivä.

Taulukosta 4.3 nähdään, että lumen syvyys on noin 40 cm maastossa, kun läm-

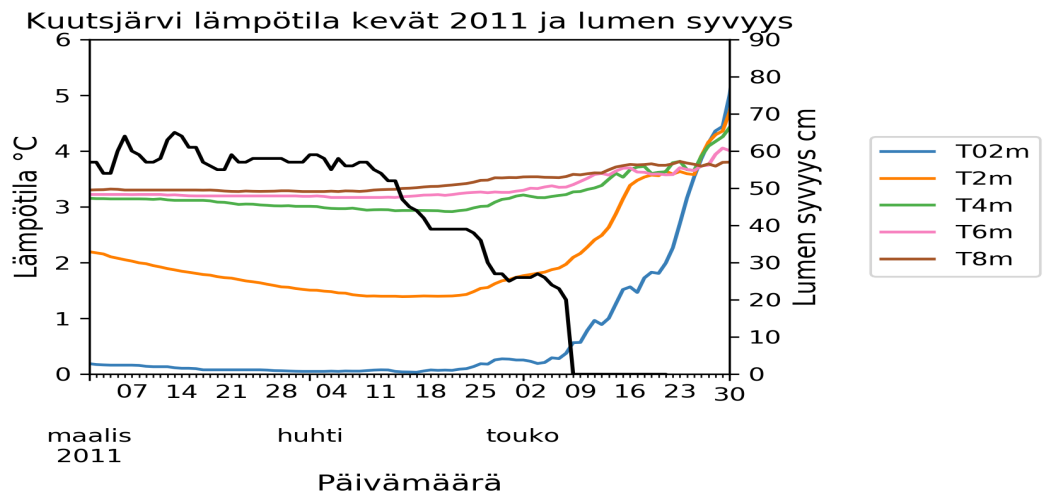
Taulukko 4.3: Taulukossa esitettynä Kuutsjärven lumen syvyys, kun lämpeneminen järvestä alkaa, kuinka monta päivää lämpeneminen kestää täyskierron alkuun sekä kuinka monta päivää täyskierrosta jää sulaa järvestä.

Vuosi	Lämpenemisen kesto	Lumen syvyys lämpenemisen alkaessa	Lumi sulanut	Jää sulaa täyskierrosta
2010	13 pvä	42 cm	13.5.	-1 pvä
2011	28 pvä	38 cm	7.5.	0 pvä
2012	14 pvä	41 cm	17.5.	0 pvä

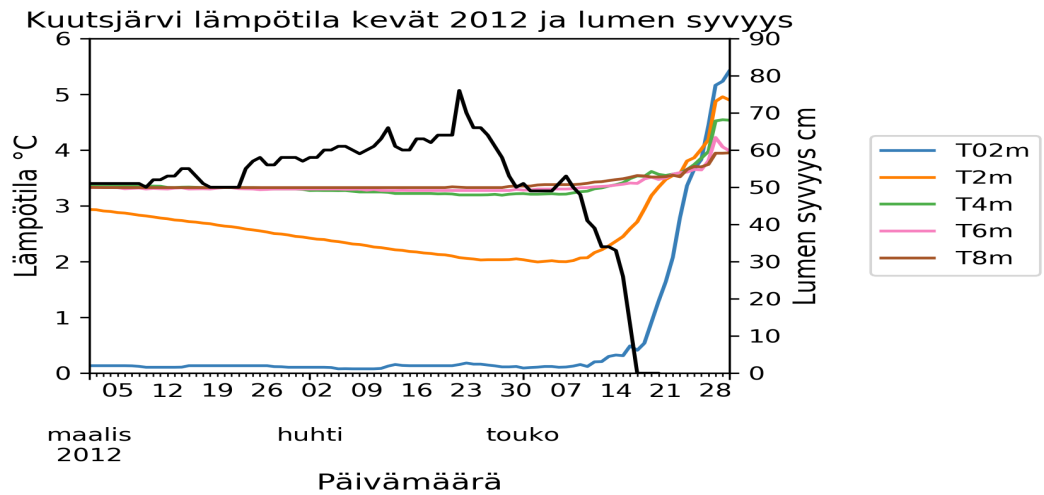
peneminen Kuutsjärvessä alkaa. Lämpenemisen kesto täyskierron alkuun vaihtelee paljon kyseisten vuosien välillä. Kuutsjärven täyskierto päättyy samaan aikaan, kun viimeiset jäät sulavat järvestä.



Kuva 4.12: Kuutsjärven lämpötila ja lumen syvyys maastossa keväällä 2010. Lumen syvyys kuvattuna mustalla käyrällä.



Kuva 4.13: Kuutsjärven lämpötila ja lumen syvyys maastossa keväällä 2011. Lumen syvyys kuvattuna mustalla käyrällä.



Kuva 4.14: Kuutsjärven lämpötila ja lumen syvyys maastossa keväällä 2012. Lumen syvyys kuvattuna mustalla käyrällä.

4.7.1 Ilman lämpötila vuosina 2009–2012

Kuvassa 4.15 nähdään vuorokauden keskilämpötila ja kyseisen vuoden kuukauden keskilämpötila sekä vuosilta 1975–2019 laskettujen kuukausien keskilämpötila.

Tammi- ja helmikuun 2010 kuukauden keskilämpötilat olivat tavanomaista viileämmät. Kuukauden keskilämpötila laskee aina helmikuulle 2010 saakka, ja helmikuun on talven kylmin kuukausi. Ilman lämpeneminen alkoi helmikuun lopussa, mutta maaliskuussa lämpötila pysytteli edelleen tavanomaista alhaisempana. Vuorokauden lämpötila vuorotteli huhtikuussa jäätymispisteen molemmin puolin, mutta kuukauden keskilämpötila oli nollan °C:n yläpuolella. Toukokuu oli keskimääräistä lämpimämpi. Kuukauden keskilämpötila nousi aina heinäkuulle saakka. Elokuun alussa vuorokauden keskilämpötila nousi nopeasti, mutta syyskuun puolivälissä vuorokauden keskilämpötila nousi hetkellisesti. Lokakuun puolivälissä vuorokauden keskilämpötila tippui alle nollan °C:n.

Kuukauden keskilämpötila laski aina helmikuulle 2011, ja helmikuun oli useita °C:ita keskiarvoa viileämpi. Huhtikuussa ilman lämpötila nousi yli nollan °C:n, ja huhtikuun oli pari astetta keskimääräistä lämpimämpi. Toukokuussa ilman lämpötila nousi ja kesäkuun alussa vuorokauden keskilämpötila kasvoi nopeasti yli kahdenkymmenen °C:n. Vuorokauden keskilämpötila tippuu kuitenkin nopeasti alle kymmenen °C:n. Heinäkuun jälkeen kuukauden keskilämpötila laski nopeasti. Vuorokauden keskilämpötila nousi elokuun puolivälissä, mutta syyskuun alussa ilman lämpötila laski jälleen. Kuukauden keskilämpötilat loppusyksystä aina vuoden vaihteeseen asti olivat keskimääräistä korkeammat. Vuorokauden keskilämpötila ei alkutalven aikana juurikaan laskenut -10 °C alemmaksi, kuten kuvasta 4.15 voidaan nähdä.

Alkuvuodesta 2012 oli kireitä pakkaspäiviä, mutta kuukauden keskilämpötila pysytteli tammi- ja helmikuussa tavanomaisissa lukemissa. Vuorokauden keskilämpötila alkoi laskea helmikuun lopulla. Maaliskuun lopussa tapahtuva viileneminen

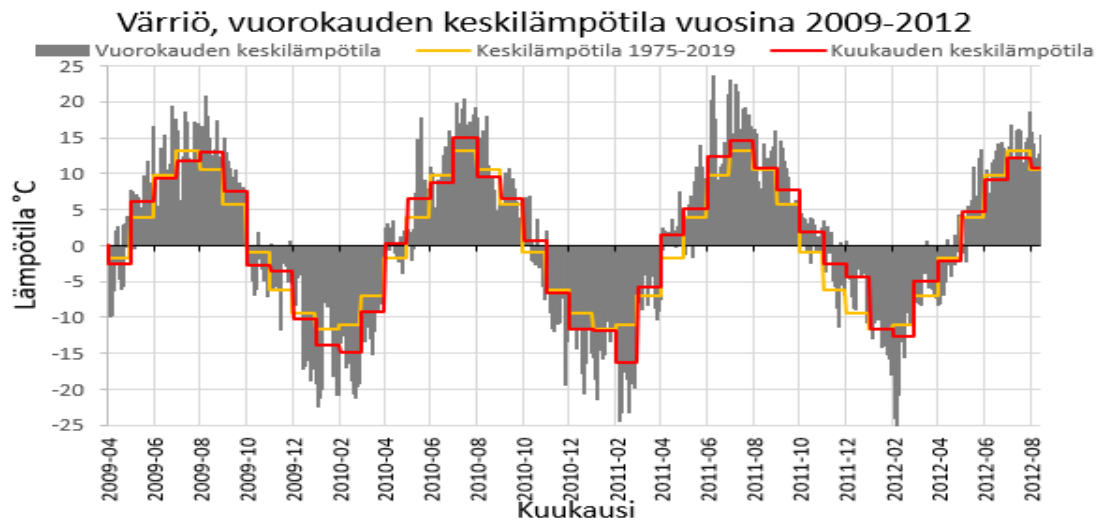
hidasti lämpenemistä. Kuukauden keskilämpötila nousi nollan °C:n yläpuolelle toukokuussa. Kesäkuukausien 2012 keskilämpötila seurasivat vuosilta 1975–2019 laskettujen kuukauden keskiarvojen käyrää aina elokuulle saakka.

4.7.2 Lumiolosuhteet 2009–2012

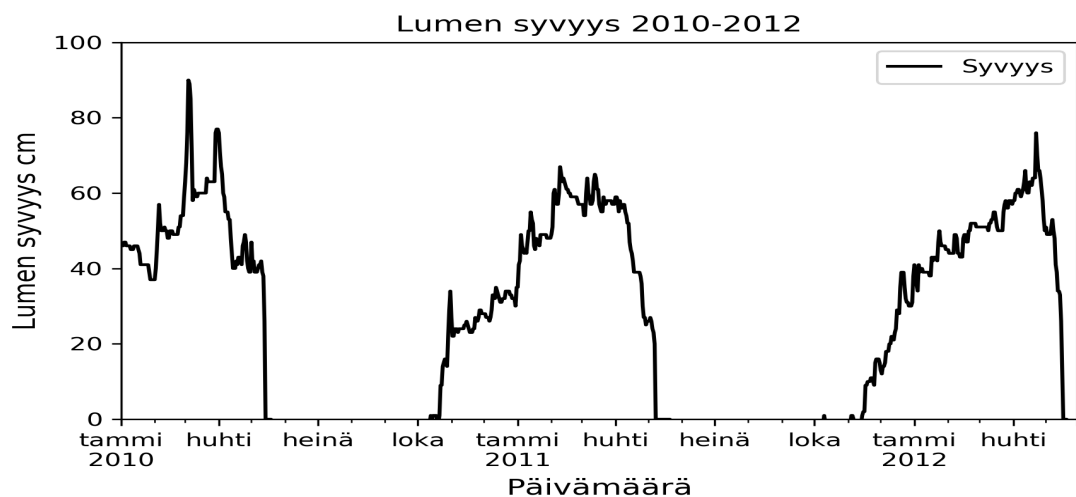
Kuvassa 4.16 on lumensyvyys Värriön Ilmatieteen laitoksen mittausasemalta vuosina 2010–2012. Lumensyvyys kasvoi maaliskuulle 2010, jolloin lumen paksuus oli korkeimmillaan 90 cm. Lumi sulii hitaasti huhtikuun aikana, mutta toukokuun alun jälkeen 47 cm paksu lumipeite hävisi kahden ensimmäisen viikon kuluessa.

Syksyllä 2010 ensilumi satoi lokakuun puolivälissä, ja lumen syvyys kasvoi maaliskuulle 2011 saakka. Suurimmillaan lumipeitteen paksuus oli maaliskuun alussa 61 cm. Maaliskuun lopussa lumipeite alkoi sulaa ja huhtikuun aikana lumen syvyys laski. Huhtikuun lopussa ja toukokuun alussa lumen sulaminen oli voimakasta, ja viimeiset lumet sulivat toukokuun alussa.

Ensilumi satoi lokakuun 2011 alussa, mutta sulii päivää myöhemmin. Pysyvämpi lumipeite satoi Värriöön lokakuun puolivälin jälkeen. Joulukuun aikana lumipeite kasvoi nopeasti ja alkuvuodesta 2012 rauhallisemmin. Lumen syvyys kasvoi huhtikuun loppuun saakka, ja paksuimmillaan, 76 cm, lumipeite oli 23. huhtikuuta. Toukokuun 2012 alussa lumen paksuus oli vielä yli 50 cm, mutta viimeisetkin hanget sulivat toukokuun 20. päivään mennessä.



Kuva 4.15: Kuvassa on Värriön vuorokauden keskilämpötila kuvattuna harmailla palkeilla, kuukauden keskilämpötila punaisella ja vuosien 1975-2019 kuukauden keskilämpötila keltaisella.



Kuva 4.16: Kuvassa on Värriön lumensyvyys vuosina 2010-2012.

5. Keskustelu

Tässä luvussa vertaillaan Kuutsjärven ja Tippakurulammen tuloksia Kilpisjärveen ($69^{\circ} 03'N$ ja $20^{\circ} 50'E$), Saanajärveen ($69^{\circ} 05'N$ ja $20^{\circ} 87'E$), Lammin Pääjärveen ($61^{\circ} 04'N$ ja $25^{\circ} 08'E$) ja Hyytiälän Kuivajärveen ($61^{\circ} 30'N$ ja $24^{\circ} 16'E$). Pää- ja Kuivajärvi sijaitsevat noin 700 kilometriä Värriötä etelämmässä ja Kilpis- ja Saanajärvi noin 200 kilometriä pohjoisemmassa. Lisäksi Kuutsjärvi sijaitsee 200 metriä meren pinnasta korkeammalla kuin Pää- ja Kuivajärvi, mutta sata metriä alempana kuin Kilpisjärvi ja 300 metriä alempana kuin Saanajärvi.

5.1 Talvi

Värriön Kuutsjärven jäätalvi kestää kuukauden pidempään kuin Lammin Pääjärven [Jakkila et al., 2009] ja Hyytiälän Kuivajärven [Ala-Könni, 2019], mutta kaksi viikkoa lyhempään kuin Kilpisjärven [Lindgren, 2015] ja kuukauden lyhempään kuin Saanajärven [Sorvari et al., 2000]. Korhonen (2019) esittää jäätalven lyhentyneen Pohjois-Suomessa 12,8 päivää vuodesta 1886. Tulokset viittaavat siihen, että mahdollisesti Kuutsjärven ja Tippakurulammen jäätalvi on lyhentynyt ja tulee tulevaisuudessa lyhenemään.

Kuutsjärven jäätymisajankohdat vaihtelevat vuosittain ilman lämpötilan mukaan. Pinnassa 20 cm:n syvyydellä vesi on selvästi muita syvyyksiä viileämpää, alle kahden $^{\circ}C$:n. Neljän, kuuden ja kahdeksan metrin syvyydellä on yhtenäinen alusvesi, mutta kahden metrin syvyydellä veden lämpötila on hieman alusvettä lämpi-

mämpi. Kuutsjärvi on kerrostunut jäätyessään. Lämpötilaero alusveden ja kahden metrin syvyyden välillä on suurempi syksyllä 2010. Todennäköinen syy lämpötilaprofiilin eroavaisuuteen on, että syksy 2011 on syksyä 2010 lämpimämpi.

Jääkannen muodostumisen jälkeen Kuiva- ja Pääjärvessä on havaittavissa samankaltainen lämpövuoto sedimentistä kuin Kuutsjärvessä ja Tippakurulammissa [Ala-Könni, 2019][Jakkila et al., 2009]. Lämpövuoto alkaa heti jääkannen muodostuttua ja ehtyy talven kuluessa kaikissa järvissä. Kilpisjärvessä lämpövuotoa sedimentistä ei ole havaittu, koska lämpöä ei ehdi varastoitumaan sedimenttiin lyhyen kesän aikana [Lindgren, 2015].

Talvikerrostuneisuus kaikissa järvissä on hyvin samankaltainen sedimentin lämpövuon ehdyttyä. Pinnassa on viileä noin $+1$ °C:inen vesimassa, jonka jälkeen lämpötila nousee ja lämpötila on pohjassa kolmesta neljään °C.

Sulamiskaudella järvien lämpeneminen eroaa sijainnin vuoksi toisistaan. Tippakurulammissa ja Kuutsjärvessä lämpeneminen alkaa toukokuun alussa, kun lumen syvyys maastossa on noin 40 cm. Pää- ja Kuivajärvessä veden lämpeneminen alkaa jo maaliskuun aikana [Jakkila et al., 2009] [Ala-Könni, 2019]. Kilpisjärvessä lämpeneminen alkaa toukokuun lopussa [Lindgren, 2015] ja Saanaajärvessä kesäkuun lopussa [Sorvari et al., 2000]. Kilpisjärvi oli lähes lumeton Lindgrenin (2015) mittauksen aikana. Kuutsjärvessä lumipeitteen sulaminen mahdollistaa auringon säteilyn kulkeutumisen jään läpi. Suurin vaikuttava tekijä veden lämpenemisen alkamisen ajankohtaan on järven sijainti ja korkeus merenpinnasta, jotka vaikuttavat auringon säteilyn voimakkuuteen sekä ilmanlämpötilaan.

5.2 Kevään täyskierto

Jäiden lähtö sekä Kilpis-, että Kuutsjärvessä tapahtuu lähes samaan aikaan kevään täyskierron kanssa [Lindgren, 2015]. Kuutsjärvessä täyskierto alkaa jo jääkannen alla. Tippakurulammen jäätymis- ja sulamisajankohdista ei ole tilastoja, joten ei

voida varmuudella sanoa, tapahtuuko keväinen täyskierto Tippakurulammissa ennen jäiden sulamista. Kuivajärvässä täyskierto on tapahtunut ennen jään sulamista ja jää sulaa 19 päivää täyskierron jälkeen [Ala-Könni, 2019]. Myös Pääjärvässä täyskierto tapahtuu jään alla huhtikuun aikana. Saanajärvässä täyskierto alkaa jäiden lähdettyä kesäkuun lopussa. Aurinko on tärkein kevään täyskiertoon vaikuttava tekijä [Jakkila et al., 2009].

Tippakurulammissa sekä Kuuts- Kilpis-, Saana- ja Kuivajärvässä kevään täyskierto on lyhyt, ainoastaan muutaman päivän mittainen. Kuuts-, Saana- ja Kilpisjärvässä lyhyt kierto selittyy sillä, että järven päällä ei ole enää jääkantta, joka sitoisi lämpöä sulamiseen, vaan kaikki saatavilla oleva säteily sitoutuu veteen muodostaen kesäkerrostuneisuutta. [Sorvari et al., 2000] [Lindgren, 2015] Pääjärvässä kierto kestää useita viikkoja, mutta Pääjärven syvin kohta onkin yli 40 metriä syvä, ja järvi on kooltaan muita suurempi [Jakkila et al., 2009]. Vaikuttaa siltä, että pohjoisissa pienissä järvissä kevään täyskierto ajoittuu samaan aikaan jäiden lähdön kanssa suojaisissa olosuhteissa ja kierto on lyhyt. Suotuisissa olosuhteissa kierto saattaa tapahtua jo jääkannen alla.

5.3 Kesä

Kesäkerrostuneisuus alkaa muodostumaan Tippakurulammissa ja Kuutsjärvässä heti kevään täyskierron ja jään sulamisen jälkeen. Samoin kerrostuneisuus muodostuu Kilpisjärvässä [Lindgren, 2015]. Kuivajärvi kerrostuu jo jääkannen alla [Ala-Könni, 2019].

Kuutsjärvässä on havaittavissa selkeä kerrostunut rakenne kesän aikana, kun taas Tippakurulampi lämpenee pohjaa myöten. Samoin Saanajärvässä on havaittavissa selkeä kesäkerrostuneisuus. Sekä Kuutsjärvässä ja Tippakurulammissa että Saana- ja Kuivajärvässä [Mammarella et al., 2018] vuoden korkeimmat lämpötilat saavutetaan heinä-elokuussa, jonka jälkeen järvet alkavat jäähtyä. Saanajärvässä ke-

säkerrostuneisuus kestää ainoastaan muutamia viikkoja, jonka jälkeen syksyn täyskierto alkaa. Kuutsjärvi ja Tippakurulampi ovat kerrostuneena noin neljän kuukauden ajan. [Sorvari et al., 2000] Järven sijainti ei siis vaikuta maksimilämpötilojen ajankohtaan, vaan lämpötilan korkeuteen sekä sulavesikauden keston.

Kesäkerrostuneisuuden vahvuuteen vaikuttaa ilman lämpötila. Lämpimämpinä kesinä veden pintalämpötila nousee voimakkaammin ja kerrostuneisuus on vahvempi. Tuuliset olosuhteet, kuten Saanajärvellä, edesauttavat syksyn täyskierron alkamista korkeammissa lämpötiloissa [Sorvari et al., 2000]. Tippakurulammen ja Kuutsjärven kaltaisilla pienillä suojaisilla järvillä voidaan tuulen vaikutuksen arvioida olevan pieni, jolloin täyskierto alkaa pinnan jäähtyessä riittävästi. On mahdollista, että Tippakurulammen ja Kuutsjärven kaltaisilla järvillä syksyn täyskierto alkaisi aiemmin tuulisissa olosuhteissa.

5.4 Syksyn täyskierto ja Kuutsjärven jäätyminen

Kesän aikana Tippakurulampi lämpenee matalampana järvenä pohjaa myöten, kun taas Kuutsjärven lämpötila pysyy kuuden ja kahdeksan metrin syvyydellä lähes muuttumattomana. Kuutsjärven täytyy siis jäähtyä syksyn aikana enemmän saavuttaakseen saman lämpötilan pohjan kanssa. Tämän ansiosta Tippakurulammen syksyn täyskierto alkaa Kuutsjärveä aiemmin. Täyskierron alussa Tippakurulammen veden tiheys on Kuutsjärven täyskiertoa alhaisempi. Tippakurulampi jäähtyy täyskierron aikana noin kolme °C, minkä ansiosta veden tiheys kasvaa. Molemmat järvet ovat puuston ja rinteiden ympäröimät, mikä heikentää tuulen sekoittavaa vaikutusta.

Saanajärven ja Tippakurulammen syksyn täyskierrossa on samoja piirteitä. Saanajärvessä syksyn täyskierto alkaa syyskuun puolivälissä ja Tippakurulammessa syyskuun lopulla. Myös Saanajärvessä syksyn täyskierto alkaa ennen kuin vesimassa on saavuttanut tiheysmaksiminsa, ja järvi jäähtyy täyskierron aikana, kuten

Tippakurulampi. Saanajärvi sijaitsee tunturissa, jossa tuulisuus edesauttaa sekoittuneena pysymistä ja jäähtymistä. Tippakurulammessa syksyn täyskierron kesto on Saanajärveä lyhyempi. [Forsström et al., 2005] [Sorvari et al., 2000]

Etelämpänä sijaitsevalla Kuivajärvellä syksyn täyskierto alkaa selvästi myöhempään, lokakuussa. Kuivajärvi pysyy sekoittuneena lokakuusta marraskuuhun ja jäähtyy täyskierron aikana, kuten Tippakurulampi. [Mammarella et al., 2018] Kuutsjärvi vaikuttaisi olevan siis poikkeus, koska sen lämpötila ei muutu syksyn täyskierron aikana. Suojaisilla pienillä pohjoisen järvillä syksyn täyskierto vaikuttaa olevan lyhyt, noin kaksi viikkoa, jonka jälkeen järvi kerrostuu ennen jäähtymistä.

5.5 Mahdolliset rajoitteet mittauksissa

Veden lämpötilan mittauksissa käytössä oli yksi termistoriketju Tippakurulammen ja Kuutsjärven syvimmissä kohdassa, joten koko järvessä tapahtuvat muutokset eivät ole tiedossa. Talven aikana lähimpänä pintaa ollut anturi on saattanut jäättyä, jolloin pinnan mittaustulokset eivät olisi täysin luotettavia. Mittausten aikana ei kerätty tietoa Kuutsjärven ja Tippakurulammen jään paksuudesta. Myöskään tietoa lumensyvyyydestä jään päällä ei ole kerätty. Lumipeitteen paksuus jään päällä ja Ilmatieteen laitoksen mittausasemalla maastossa ovat todennäköisesti eronneet toisistaan. Erityisesti sulamiskaudella tieto lumipeitteen vähenemisestä jään päällä olisi ollut hyödyllinen. Tippakurulammen sulamis- ja jäätymisajankohdista ei ole tietoa. Siksi voidaan esittää ainoastaan arvauksia mahdollisista prosesseista, ja ei ole esimerkiksi varmuutta siitä, tapahtuuko kevään täyskierto Tippakurulammessa jään alla vai ei.

Kuutsjärven sulamispäiväksi on merkattu ensimmäinen täysin jäätön päivä Kuutsjärvessä. Ei kuitenkaan ole tietoa siitä, milloin järven jää on alkanut sulaa. Kuutsjärvi sulaa epätasaisesti usein ensin aseman puoleiselta rannalta ja reunoilta. Viimeisenä sulaa yleensä tuntureiden puoleinen ranta. Vaikka tutkielmassa tode-

taan, että Kuutsjärvessä täyskierto tapahtuu jääkannen alla, on mahdollista, että kierto tapahtuu esimerkiksi niin, että puolet järvestä tai lähes koko järvi on jo sulaneessa tilassa.

Kuutsjärvi on todennäköisesti pohjavesivaikutteinen järvi. Varmaa tietoa pohjaveden virtauksesta ja virtauksen suuruudesta järveen ei ole. Pohjavesi voi vaikuttaa Kuutsjärven lämpötilaan sekä vesisateeseen.

6. Johtopäätökset

Värriön luonnonpuiston alueiden järvien tutkimus on ollut vähäistä. Tämän tutkielman tavoitteena oli selvittää Värriön luonnonpuiston Tippakurulammen ja Kuutsjärven lämpötilamuutoksia ja kerrostuneisuutta kahden vuoden aikana. Mittaukset suoritettiin termistoriketjuilla järvien syvimmästä kohdasta vuosina 2009–2012. Mittausjakson aikana ilman lämpötila ja lumitilanne edustivat suurimmalta osin pidemmän aikasarjan keskimääräisiä arvoja.

Kuutsjärvi ja Tippakurulampi lämpenevät nopeasti kevään täyskierron jälkeen. Päivittäinen lämpötilan vaihtelu seuraa molemmissa järvissä ilman lämpötilan vaihtelua kesän aikana. Päivittäisen vaihtelun amplitudissa on ainoastaan vähäisiä eroja kesäkuussa 0,2 metrin syvyydellä. Kahden metrin syvyydellä päivittäinen vaihtelu on vähintään 0,8 °C voimakkaampaa Kuutsjärvessä. Kuutsjärven Secchi-syvyys on suurempi kuin Tippakurulammen, minkä ansiosta auringon säteily kulkeutuu Kuutsjärvessä Tippakurulampea syvemmällä ja näin vaikuttaa lämpötilan vaihteluihin. Kuutsjärven ja Tippakurulammen suojauksessa ei ole eroavaisuutta.

Alkupalvesta heti jääkannen muodostuttua Kuutsjärvessä ja Tippakurulammessa on havaittavissa lämpenemistä kahden metrin syvyydellä. Kuutsjärvessä lämpeneminen on voimakkaampaa. Lämpeneminen johtuu sedimentin lämpövuosta. Lämpövuoto ehtyy tammikuuhun mennessä ja pohjan lämpötila laskee. Tippakurulammen ja Kuutsjärven kerrostuneisuus ei poikkea toisistaan talven aikana.

Kevään täyskierto alkaa molemmissa järvissä samaan aikaan, kun maastossa

lumen syvyys on noin 40 cm. Kuutsjärvessä täyskierto alkaa jääkannen alla, mutta päättyy samaan aikaan jäiden lähdön kanssa. Veden tiheydessä ei ole eroja järvien välillä kevään täyskierron aikana. Syksyllä täyskierto Tippakurulammissa alkaa Kuutsjärveä aiemmin, ja Tippakurulammen lämpötila laskee sekoittuneessa tilassa noin kolme °C .

Tippakurulampi ja Kuutsjärvi poikkeavat selkeimmin toisistaan pohjan lämpötilaerojen ja lämpövarastoa verrattaessa. Lämpövarasto Tippakurulammen pohjalla on Kuutsjärveä aktiivisempi. Vaikka Tippakurulammissa lämpötilan muutokset ovat voimakkaampia, on Kuutsjärven lämpövarasto Tippakurulampea suurempi erityisesti talvella. Tippakurulampi lämpenee kesän aikana pohjaa myöten, ja järvien lämpötilaprofiilit poikkeavat toisistaan kesällä. Pohjaveden vaikutusta Kuutsjärveen ei tunneta. Erot järvien välillä selittyvät koko- ja tummuuseroilla.

Aikasarjojen lyhyys sekä osittain puutteelliset tiedot jäätymis- ja sulamisajankohdista rajoittavat johtopäätösten tekemistä. Värriön luonnonpuistossa ei ole aiemmin seurattu järvien lämpötiloja ympärivuotisesti, joten vertailua aikaisempiin tuloksiin ei pystytä tekemään. Mittaukset kuitenkin lisäsivät ymmärrystä Värriön luonnonpuiston sekä muiden pienten arktisen alueiden järvien kerrostuneisuudesta ja prosesseista.

Kiitokset

Kiinnostuin Kuutsjärvestä työskennellessäni ensimmäistä kertaa Värriön tutkimus-
asemalla kesällä 2019, ja tein kandidaatin tutkielman Kuutsjärven lämpötilan muu-
toksista kesän aikana käyttäen mittauksissa CTD-luotainta. Tämä pieni tutkimus-
projekti herätti kiinnostukseni järvien tutkimukseen. Olen kiitollinen siitä, että
olen saanut syventää ymmärrystäni Värriön alueen järvistä edelleen maisteritutkiel-
massa!

Kiitos ohjaajilleni Matti Leppärannalle ja Jan Weckströmille kärsivällisyydestä
ja kaikesta avusta tässä prosessissa. Haluan kiittää Jan Weckströmiä myös tutkiel-
maa varten luovutetusta aineistosta. Tutkielmani valmistuu kummallisena aikana,
mikä on varmasti tuonut omat haasteensa myös ohjaajana toimimiseen. Suurkii-
tokset Värriön tutkimusaseman väelle täysistä ruokavarastoista ja kesistä luonnon-
puistossa. Täydellä vatsalla kesän hermoloman jälkeen on jaksanut opiskella talvet
tehokkaasti.

Kiitän perhettäni taloudellisesta tuesta opintojen aikana sekä muuttoavusta
poukkoillessani pitkin Suomea. Kiitos Mirja, Salla ja Riikka kaikesta hupsuttelusta
vuosien varrella ja siitä, että olette pysyneet matkassa päiväkodin hiekkalaatikolta
asti. Kiitos Mikalle kuuntelusta pitkien puheluiden aikana, lenkkiseurasta säässä
kuin säässä ja elämän tärkeiden asioiden muistuttamisesta. Nyt on minun vuoroni
tukea sinua tässä prosessissa. Lopuksi haluan kiittää kaikkia matkan varrella tulleita
opiskelijakavereitani Joensuussa ja Helsingissä sekä Karjalaista Osakuntaa lystistä.

Lähteet

- Ala-Könni, 2019 Ala-Könni, J. (2019). Mixing processes under seasonal ice cover in boreal lake Kuivajärvi. Pro gradu.
- Autio and Heikkinen, 2002 Autio, J. and Heikkinen, O. (2002). The climate of northern Finland. *Fennia-International Journal of Geography*, 180(1-2):61–66.
- Beletsky et al., 2012 Beletsky, D., Hawley, N., Rao, Y. R., Vanderploeg, H. A., Beletsky, R., Schwab, D. J., and Ruberg, S. A. (2012). Summer thermal structure and anticyclonic circulation of Lake Erie. *Geophysical Research Letters*, 39(6).
- Blanken et al., 2011 Blanken, P. D., Spence, C., Hedstrom, N., and Lenters, J. D. (2011). Evaporation from lake superior: 1. physical controls and processes. *Journal of Great Lakes Research*, 37(4):707–716.
- Dingman, 2016 Dingman, S. L. (2016). *Physical hydrology*. Waveland Press, Inc., Long Grove, Illinois, third edition. edition.
- Dodds, 2010 Dodds, W. K. (2010). *Freshwater ecology : concepts and environmental applications of limnology*. Aquatic ecology. Academic Press, Amsterdam ; Boston, 2nd ed edition.
- Elo, 2007 Elo, A.-R. (2007). *Effects of climate and morphology on temperature conditions of lakes*. PhD thesis, Väitöskirja :, Helsinki. Artikkeliväitöskirjan yhteenvedo-osa ja 7 eripainosta.
- Eloranta, 1997 Eloranta, P. (1997). *Limnologian perusteet : (LIMNO 10) : luentorunko*. Helsingin yliopisto. Limnologian ja ympäristönsuojelun laitos, Helsinki.

- Forsström et al., 2005 Forsström, L., Sorvari, S., Korhola, A., and Rautio, M. (2005). Seasonality of phytoplankton in subarctic Lake Saanajärvi in NW Finnish Lapland. *Polar biology*, 28(11):846–861.
- Franke et al., 2019 Franke, A., Feilhauer, H., Bräuning, A., Rautio, P., and Braun, M. (2019). Remotely sensed estimation of vegetation shifts in the polar and alpine tree-line ecotone in Finnish Lapland during the last three decades. *Forest ecology and management*, 454:117668–.
- Gorham and Boyce, 1989 Gorham, E. and Boyce, F. M. (1989). Influence of lake surface area and depth upon thermal stratification and the depth of the summer thermocline. *Journal of Great Lakes research*, 15(2):233–245.
- Heiskanen et al., 2015 Heiskanen, J. J., Mammarella, I., Ojala, A., Stepanenko, V., Erkkilä, K.-M., Miettinen, H., Sandström, H., Eugster, W., Leppäranta, M., Järvinen, H., Vesala, T., and Nordbo, A. (2015). Effects of water clarity on lake stratification and lake-atmosphere heat exchange. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(15):7412–7428.
- Houser, 2006 Houser, J. N. (2006). Water color affects the stratification, surface temperature, heat content, and mean epilimnetic irradiance of small lakes. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 63(11):2447–2455.
- Huttunen et al., 2003 Huttunen, J. T., Alm, J., Liikanen, A., Juutinen, S., Larmola, T., Hammar, T., Silvola, J., and Martikainen, P. J. (2003). Fluxes of methane, carbon dioxide and nitrous oxide in boreal lakes and potential anthropogenic effects on the aquatic greenhouse gas emissions. *Chemosphere (Oxford)*, 52(3):609–621.

- Ilmatieteenlaitos, 2019 Ilmatieteenlaitos (2019). Sade. <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/sade>.
- Jakkila et al., 2009 Jakkila, J., Leppäranta, M., Kawamura, T., Shirasawa, K., and Salonen, K. (2009). Radiation transfer and heat budget during the ice season in Lake Pääjärvi, Finland. *Aquatic Ecology*, 43:681–692.
- Jones and Harris, 1992 Jones, F. E. and Harris, G. L. (1992). Its-90 density of water formulation for volumetric standards calibration. *Journal of research of the National Institute of Standards and Technology*, 97(3):335.
- Jousi, 2017 Jousi, N. (2017). ¹³⁷Cs-ajoitusmenetelmän tarkkuus ja luotettavuus. Pro gradu.
- Kirillin et al., 2012 Kirillin, G., Lepparanta, M., Terzhevik, A., Granin, N., Bernhardt, J., Engelhardt, C., Efremova, T., Golosov, S., Palshin, N., Shershtyankin, P., Zdorovenova, G., and Zdorovenov, R. (2012). Physics of seasonally ice-covered lakes: a review. *Aquatic Sciences*, 74(4):659–682.
- Kirk, 2011 Kirk, J. T. O. (2011). *Light and photosynthesis in aquatic ecosystems*. Cambridge University Press, Cambridge, UK ; New York, 3rd ed edition.
- Kiuru et al., 2018 Kiuru, P., Ojala, A., Mammarella, I., Heiskanen, J., Kämäräinen, M., Vesala, T., and Huttula, T. (2018). Effects of climate change on CO₂ concentration and efflux in a humic boreal lake: A modeling study. *Journal of geophysical research. Biogeosciences*, 123(7):2212–2233.
- ko Woo et al., 1981 ko Woo, M., Heron, R., and Steer, P. (1981). Catchment hydrology of a high arctic lake. *Cold Regions Science and Technology*, 5(1):29–41.

- Leppäranta, 2015 Leppäranta, M. (2015). *Freezing of lakes and evolution of their ice cover*. Springer-Verlag, Germany.
- Leppäranta, 2017 Leppäranta, M. (2017). *Hydrologian perusteet*. Helsingin yliopisto, Fysiikan laitos, Helsinki, 1. painos edition.
- Leppäranta et al., 2009 Leppäranta, M., Terzhevik, A., and Shirasawa, K. (2009). Solar radiation and ice melting in Lake Vendyurskoe, Russian Karelia. *Hydrology Research*, 41(1):50–62.
- Lerman, 1978 Lerman, A. (1978). *Lakes : chemistry, geology, physics*. Springer.
- Lerman, 1995 Lerman, A., editor (1995). *Physics and chemistry of lakes*. Springer, Berlin, 2nd ed edition.
- Lindgren, 2015 Lindgren, E. (2015). Jäidenlähtö arktisilla järvillä: tarkastelussa Kilpisjärvi. Pro gradu.
- Magee and Wu, 2017 Magee, M. R. and Wu, C. H. (2017). Response of water temperatures and stratification to changing climate in three lakes with different morphometry. *Hydrology and earth system sciences*, 21(12):6253–6274.
- Mammarella et al., 2018 Mammarella, I., Gavrylenko, G., Zdorovennova, G., Ojala, A., Erkkilä, K.-M., Zdorovennov, R., Stepanyuk, O., Palshin, N., Terzhevik, A., Vesala, T., and Heiskanen, J. (2018). Effects of similar weather patterns on the thermal stratification, mixing regimes and hypolimnetic oxygen depletion in two boreal lakes with different water transparency.
- Milardi, 2015 Milardi, M. (2015). *Fish out of place : evaluating the impact of fish introductions on freshwater ecosystems*. PhD thesis, Helsinki.

- O'Sullivan and Reynolds, 2003 O'Sullivan, P. E. and Reynolds, C. S. (2003). *The lakes handbook. Vol. 1, Limnology and limnetic ecology*. Blackwell Science, Malden, MA.
- Sorvari et al., 2000 Sorvari, S., Rautio, M., and Korhola, A. (2000). Seasonal dynamics of the subarctic Lake Saanajärvi in Finnish Lapland. *Verhandlungen der Internationalen Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie*, 27(1):507–512.
- Stepanenko et al., 2020 Stepanenko, V. M., Valerio, G., and Pilotti, M. (2020). Horizontal pressure gradient parameterization for one-dimensional lake models. *Journal of advances in modeling earth systems*, 12(2).
- Strangeways, 2007 Strangeways, I. (2007). *Precipitation: theory, measurement and distribution*. Cambridge University Press, Cambridge; New York.
- SYKE, 2020 SYKE (2020). Valuma-arvo. <http://paikkatieto.ymparisto.fi/value/>.
- Tallberg et al., 2015 Tallberg, P., Opfergelt, S., Cornelis, J.-T., Liljendahl, A., and Weckström, J. (2015). High concentrations of amorphous, biogenic Si (BSi) in the sediment of a small high-latitude lake: implications for biogeochemical Si cycling and for the use of BSi as a paleoproxy. *Aquatic Sciences*, 77(2):293–305.
- Helsingin yliopisto, 2020 Helsingin yliopisto (2020). Värriö subarctic research station. <https://www.helsinki.fi/en/research-stations/varrio-subarctic-research-station>.
- Uusitalo, 2019 Uusitalo, J. (2019). Järveen purkautuvan pohjaveden laadun ja määrän vaikutus Puruveden lahtien vedenlaatuun ja vesitaseeseen. Pro gradu.

Ympäristöhallinto, 2019 Ympäristöhallinto (2019). Värriö. [https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Luonto/Suojelualueet/Natura_2000_alueet/Varrio\(6279\)](https://www.ymparisto.fi/fi-FI/Luonto/Suojelualueet/Natura_2000_alueet/Varrio(6279)).